

РАДИОЛОКАЦИОННАЯ АСТРОНОМИЯ

В. А. Котельников

Вестник АН СССР, 1982, вып. 6, с. 51¹⁾

Я выражаю глубокую благодарность Президиуму нашей академии за большую награду, которую мне сегодня вручили, за очень высокую оценку моей деятельности. Мне также хочется выразить признательность всем поздравившим меня с этой наградой.

Я занимался многим: созданием и совершенствованием аппаратуры и систем связи, вопросами выделения сигналов, теорией информации, исследованием космоса, развитием радиоэлектроники, составлением Комплексной программы развития нашей страны на 20 лет вперед и так называемой научно-организационной работой. Обдумывая сегодняшнее выступление, я был в некоторой нерешительности, какую тему для него выбрать. Поскольку о комплексной программе на одном из Общих собраний академии я уже говорил, а выступление должно быть интересным и понятным для слушателей, мой выбор пал на радиоэлектронику. При этом основную часть выступления я решил посвятить частному, но, на мой взгляд, интересному вопросу — радиолокационной астрономии.

В радиолокационной астрономии, так же как и в радиолокации, расстояние до исследуемого объекта измеряется по времени, которое затрачивают радиоволны на путь от локатора до объекта наблюдения и обратно, а скорость приближения или удаления объекта от локатора определяется по изменению частоты отраженного сигнала из-за эффекта Доплера. Первые радиолокационные наблюдения небесных тел были проведены сразу после второй мировой войны с помощью созданных к этому времени военных радиолокаторов. При этом удалось лоцировать лишь Луну. Для локаций других, более удаленных тел не хватало мощности. Дело в том, что мощность возвращающегося к локатору отраженного сигнала обратно пропорциональна четвертой степени расстояния до отражающего объекта.

Если учесть эту зависимость, размеры самолета, Луны и ближайшей к нам планеты — Венеры, то окажется, что для локаций самолетов и Луны нужны локаторы примерно одинаковой мощности.

¹⁾ Доклад на годовом общем собрании АН СССР по случаю присуждения ему Золотой медали им. М. В. Ломоносова

Однако для локации Венеры, из-за большого расстояния до нее, нужно мощность локатора повысить в 10^7 раз. Такая возможность появилась только в начале 60-х годов. Ее удалось реализовать благодаря созданию очень больших антенн, концентрирующих излучаемую энергию в узких пучках и собирающих возвращающуюся энергию с больших площадей, более мощных передатчиков и более чувствительных приемников, а также благодаря усовершенствованию методов выделения сигналов из помех.

Первые успешные радиолокационные наблюдения планеты нашей Солнечной системы (ближайшей к нам планеты Венеры) были осуществлены в СССР, Англии и США в апреле 1961 г. во время так называемого соединения, при котором расстояние между Землей и Венерой становится минимальным. С тех пор методы локации продолжали совершенствоваться, и как в СССР, так и в США было проведено большое число радиолокационных наблюдений Венеры, Марса и Меркурия.

В чем преимущество радиолокационных наблюдений за планетами по сравнению с оптическими?

Оптическая астрономия довольно хорошо определяет направление на планету. Тут точность измерения сейчас доходит в лучшем случае до десятых долей угловой секунды (до 10^{-6} рад) и определяется в основном случайными отклонениями светового луча в атмосфере Земли. Это, в частности, дает ошибку в измерении положения Венеры при наибольшей близости ее к Земле в 40 км. Однако измерить дальность до планеты оптическими средствами удастся очень неточно. Такие измерения осуществляются с помощью наблюдения планеты из двух различных точек, определения углов и затем расчета сторон треугольника, у которого известная сторона много меньше, чем две другие. Как нетрудно подсчитать для рассмотренного случая с Венерой, определенное расстояние до планеты может быть осуществлено этим способом с погрешностью в 250 тыс. км!

Радиолокация обеспечивает существенно большую точность. Так, используемый нами сейчас радиолокатор реально дает при измерении дальности до Венеры погрешность, равную всего лишь 0,3 км. Интересно отметить, что достигнутая относительная точность измерения расстояний космическим локатором на несколько порядков выше, чем точность геодезических измерений расстояний на поверхности Земли. Это обуславливается тем, что в первом случае радиоволны проходят основной путь в безвоздушном пространстве, где их скорость строго постоянна.

Кроме измерения расстояний, локаторы, как было упомянуто, позволяют измерять скорости сближения с планетой или удаления ее от нас — также с очень большой точностью — по смещению частоты колебаний отраженного сигнала. Например, скорость изменения расстояния до Венеры измерялась нами с точностью, превосходящей 1 см/с.

Надо отметить, что приведенные точности далеко не являются предельными. Они в основном ограничены неопределенностью, которая вносится неровностями поверхности планет. Для идеально гладкой планеты или для космического корабля точности могут быть доведены по крайней мере до 10^{-12} расстояния или, по скорости, — до 10^{-12} скорости света, то есть до 0,3 мм/с.

Радиолокация позволила намного точнее, чем раньше, предвычислить положение планет, что стало сейчас необходимым для космических полетов.

На основании оптических наблюдений, начиная от Птолемея (II век н. э.), создавались и уточнялись теории движения планет, по которым можно было предвычислить их положение. К началу 60-х годов нашего столетия теория, базируясь на оптических наблюдениях, накопившихся за века, и законах Ньютона, позволяла предсказывать положение планет на небосводе с точностью (как показала астрономическая практика) две-три угловых секунды, что при средних расстояниях до так называемых внутренних планет (Марс, Венера, Меркурий) в сотни миллионов километров давало ошибку порядка тысяч километров. Расстояние между планетами, согласно существовавшим тогда теориям, вычислялось с точностью в несколько миллионных долей от его величины, но не в километрах, а в так называемых астрономических единицах длины.

Астрономическая единица — это среднее расстояние между Землей и Солнцем. Она была известна весьма приближенно. Дело в том, что, как уже говорилось, расстояния между планетами могли быть измерены оптическими методами очень неточно. Между тем соотношения между этими расстояниями можно было вычислить гораздо точнее.

До радиолокационных измерений наиболее достоверным считалось значение астрономической единицы $149\,527\,000 \pm 10\,000$ км, полученное в 1950 г. в итоге длительных наблюдений за малой планетой Эрос. Это давало ошибку в вычислениях дальностей до планет в десятки тысяч километров. Первые же радиолокационные наблюдения Венеры в 1961 г. вызвали сенсацию. Сравнение дальности до Венеры, измеренной радиолокаторами в метрах и известной раньше в астрономических единицах длины, показало, что астрономическая единица равна $149\,599\,300 \pm 1000$ км, то есть примерно на 73 тыс. км больше, чем было принято астрономами; при этом погрешность оказалась в 7 раз больше, чем оценивалась раньше. Конечно, астрономы этому не поверили, однако сходность результатов, полученных у нас, в Англии и США, убеждала в правильности нового значения, и оно было заложено в расчеты траекторий полета космических кораблей к Венере. При расчетах по старым данным мы наверняка сделали бы большой промах.

Дальнейшие радиолокационные наблюдения позволили еще немного уточнить значение астрономической единицы. Сейчас мы считаем ее равной $149\,597\,868 \pm 0,3$ км.

Когда в расчет траекторий планет была введена новая астрономическая единица, ошибки стали намного меньше, но все же оказалось, что старые теории дают погрешность в положениях планет в несколько сотен километров. Это было недопустимо в случаях, когда надо было посадить космический корабль в заданную точку планеты или пролететь над ее определенным районом.

В Советском Союзе была проделана большая работа по созданию новой теории движения внутренних планет (Меркурий, Венера, Земля, Марс). При этом были использованы: радиолокационные наблюдения Венеры, Марса, Меркурия, выполненные в СССР за 1962–1980 гг. и в США за 1964–1971 гг. (дальнейшие наблюдения в США перестали публиковаться), оптические наблюдения, проведенные в Николаевской, Вашингтонской и Гринвичской обсерваториях в 1960–1976 гг., и наблюдения за движением космических кораблей «Венера-9, -10, -11 и -12». Всего было обработано около 13 тыс. наблюдений. При этом уточнялись элементы орбит Меркурия, Венеры, Марса и центра масс системы Земля–Луна, радиусы Меркурия, Венеры и Марса, а также астрономическая единица. Всего в расчеты было заложено 28 неизвестных параметров.

При обработке этих наблюдений оказалось, что, используя уравнения классической механики Ньютона и учитывая взаимодействия планет между собой, нельзя подобрать перечисленные параметры так, чтобы получить расхождения между измеренными величинами и вычисляемыми в пределах точности измерений. Расхождения выходили за эти пределы. Они достигали 390 км для Меркурия, 8 км для Венеры и 12 км для Марса. Поэтому в создаваемой теории пришлось использовать не уравнения Ньютона, а уравнения общей теории относительности, то есть учитывать изменения свойств пространства и времени под влиянием поля тяготения. При использовании этих уравнений удалось свести среднеквадратичные отклонения между расчетом и экспериментом в период 1970–1981 гг. (до этого измерения были менее точны) до величины, равной для Венеры 0,5 км, Марса — 1 км, Меркурия — 2 км по дальности и 1,2 угловой секунды по углам. При этих расчетах учитывался и рельеф планет.

Чтобы еще раз убедиться, что Венера находится там, где она ожидается в соответствии с новой теорией, и обеспечить полет космических аппаратов «Венера-13» и «Венера-14» в январе и феврале этого года, мы провели очередную локацию этой планеты. Максимальные расхождения между предсказанными расстояниями до нее и измеренными оказались равными 1,2 км. По скорости эти расхождения не превысили 2,4 см/с. И это несмотря на то, что Земля и Венера прошли после последних измерений, учтенных теорией, путь больше миллиарда километров.

Таким образом, мы сейчас можем предвычислять расстояние от Земли до внутренних планет Солнечной системы с точностью порядка

Расхождения между измеренными и предвычисленными значениями расстояний до Венеры и ее радиальных скоростей

Дата	Расстояния до Венеры, млн км	Расхождения по расстоянию, км	Радиальные скорости Венеры, км/с	Расхождения по скорости, см/с
19.12.1981 г.	58,4	+0,9	11,1	-0,6
20.12.1981 г.	57,5	+0,6	10,9	-0,4
30.01.1982 г.	42,2	+0,5	5,0	-0,2
31.01.1982 г.	42,5	+1,2	4,9	-0,4
6.02.1982 г.	46,0	+0,15	7,8	-2,4

нескольких километров, то есть в десятки тысяч раз точнее, чем 20 лет тому назад — до появления радиолокационной астрономии.

Большая работа по созданию теории движения внутренних планет была проделана — конечно, с использованием имеющихся у нас больших ЭВМ — независимо тремя коллективами: Институтом прикладной математики им. М. В. Келдыша, Институтом теоретической астрономии и Институтом радиотехники и электроники АН СССР совместно с рядом неакадемических организаций на базе одних и тех же экспериментальных данных. Такая параллельная работа была запланирована, чтобы избежать ошибок в очень сложных расчетах. Полученные результаты практически совпали.

Перейду к вопросу определения скорости вращения планет. Если облучать планету даже монохроматическими колебаниями, то колебания, отраженные от различных ее частей, будут иметь различные частоты, так как из-за вращения планеты отражения от надвигающихся на нас участков из-за эффекта Доплера будут иметь более высокую частоту, а от удаляющихся участков — более низкую частоту. Это приведет к расширению спектра отраженного сигнала. По этому расширению можно вычислить скорость вращения планеты. На рис. 1 приведен пример такого спектра; стрелки показывают его границы.

До радиолокации скорости вращения планет определялись оптическими методами по наблюдению за движением отдельных образований на их поверхности. Большие трудности были только с Венерой, поверхность которой не видна из-за густой облачности. До локации Венеры отдельные исследователи оценивали период ее вращения величиной от 15 часов до 225 суток. Уже в локационных измерениях 1962 г. независимо у нас в Институте радиотехники и электроники и в Лаборатории реактивного движения в США по расширению спектра частот было установлено, что период вращения Венеры лежит в пределах от 200 до 300 суток. Причем самым удивительным оказалось, что она вращается в обратную сторону по сравнению с ожидаемым направлением — обычным для других планет Солнечной системы.

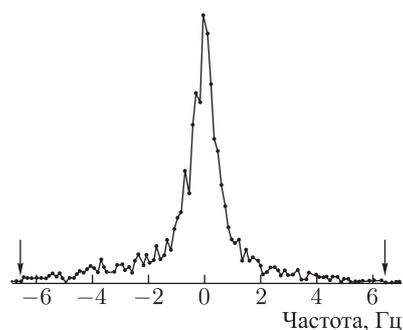


Рис. 1. Спектр мощности отраженного Венерой монохроматического радиосигнала

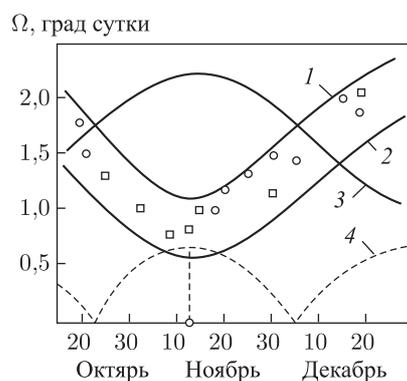


Рис. 2. Вычисленные и измеренные значения видимой скорости вращения Венеры. Ω — видимая скорость вращения; вычисленные значения Ω : 1 — для $T = -200$ суток, 2 — для $T = -300$ суток, 3 — для $T = +225$ суток, 4 — для $T = \infty$ (T — период собственного вращения); измеренные значения Ω : \circ — Институт радиотехники и электроники АН СССР, \square — Лаборатория реактивного движения Калифорнийского технологического института (США); точкой на горизонтальной оси обозначена дата нижнего соединения

Направление вращения было определено по изменению видимой с Земли скорости вращения Венеры ото дня ко дню. Дело в том, что измеряемая с Земли скорость вращения планеты складывается из двух слагаемых: из истинной, постоянной скорости вращения самой планеты, которая была неизвестна, и из кажущейся скорости, обусловленной относительным движением Венеры по отношению к Земле. Кажущаяся скорость меняется во времени и может быть вычислена. В конечном счете изменения результирующей скорости, которую мы измеряем радиолокатором, будут зависеть, как от величины периода собственного вращения, так и от направления вращения. Сличая

эксперимент с предвычисленными величинами, можно оценить период и направление вращения.

Кривые на рис. 2 показывают вычисленные значения видимой скорости вращения для разных моментов времени в зависимости от предполагаемого периода вращения Венеры. Здесь же обозначены экспериментальные данные полученные еще в 1962 г.: кружками — наши, квадратами — американские. Как видно, точки хорошо располагаются между кривыми, вычисленными для периодов —200 и —300 суток.

Чем объяснить обратное по сравнению с другими планетами и противоречащее теории образования Солнечной системы вращение Венеры, мы пока не знаем.

Сейчас скорость вращения Венеры установлена с большой точностью, благодаря многолетнему радиолокационному наблюдению над движением сильно пересеченных участков поверхности этой планеты, которые дают особо интенсивное рассеянное отражение. Эти зоны хорошо видны на спектре отраженного сигнала (рис. 1) и перемещаются по нему по мере поворота планеты. Наблюдение за этими зонами показало, что Венера в момент соединения, то есть когда она находится всего ближе к нам, поворачивается к Земле всегда одной и той же стороной, а значит, вращение Венеры вокруг ее оси синхронизировано с движением Земли вокруг Солнца. Факт неожиданный, учитывая большое расстояние между этими планетами.

Сейчас период вращения Венеры вокруг оси, по нашим данным, равен $243,04 \pm 0,03$ земных суток. В США получены сходные результаты. Для строго синхронного движения этот период должен был бы составлять 243,16 суток. Имеющаяся незначительная разница может быть объяснена небольшим покачиванием Венеры около строго синхронного движения.

Наблюдение над движением сильно рассеивающих радиоволны областей на поверхности Венеры позволило также определить направление оси вращения этой планеты. Оказалось, что ось почти перпендикулярна плоскости планетной орбиты (отклонение меньше 2°).

Интересно получилось с Меркурием. На нем нет облаков, поэтому его период по оптическим наблюдениям определили давно — считалось, что его вращение засинхронизовано Солнцем, и он всегда обращен к нему одной и той же стороной, так же, как Луна к Земле. Радиолокационные же наблюдения показали, что дело обстоит не так. Синхронизация оказалась более сложной, а именно: за два оборота по орбите Меркурий делает не два, как считалось ранее, а три оборота вокруг своей оси. Этот результат был получен в США. Астрономы опять этому не поверили. Они достали старые зарисовки и фотографии Меркурия, снова их проанализировали и в результате признали, что данные их наблюдений дают, оказывается, многозначный ответ, чего они раньше не заметили, и что результаты радиолокации не противоречат одному из этих ответов.

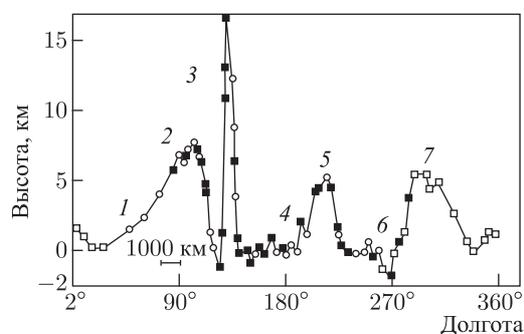


Рис. 3. Профиль высот Марса вдоль его экватора на широте $20\text{--}21^\circ$ с.ш. ■ — февраль 1980 г., □ — март 1980 г., ○ — апрель 1980 г.; 1 — Chryse, 2 — Tharsis montes, 3 — Olympus mons, 4 — Amazonis, 5 — Elysium, 6 — Isidis, 7 — Syrtis major

Радиолокационные наблюдения позволяют измерить высоту гор на планетах. Действительно, мы сейчас можем вычислить расстояние до центра масс планеты и измерить расстояние до наиболее близкой к нам отражающей точки. Разность этих величин, очевидно, будет характеризовать высоту поверхности планеты в ближайшей точке. На рис. 3 виден снятый нашим радиолокатором профиль высот Марса вдоль его экватора. Так как за период наблюдения Марс сделал несколько оборотов, то этот профиль был промерен несколько раз. Точки, отмеченные различными значками, соответствуют различным наблюдениям в течение периода наблюдений. Как видно, они хорошо совпадают между собой. Наивысшая точка на приведенной диаграмме соответствует высоте 17,5 км над уровнем долин. Это гора Олимп.

По характеру отраженных сигналов, их интенсивности и их рассеянию можно судить о свойствах поверхности планеты — диэлектрической проницаемости ее пород и среднеквадратичном наклоне отдельных участков, соизмеримых по размерам с длиной волны облучающих колебаний (в данном случае — 40 см). Оказалось, что для Марса коэффициент отражения разных участков поверхности колеблется от 3 до 14%, что соответствует диэлектрической проницаемости от 1,4 до 4,8 и характерно для грунта с плотностями $1\text{--}2,5$ г/см³. Плотность 1 г/см³ соответствует, вероятно, мелкой пыли, 2,5 г/см³ — скальным породам. Среднеквадратический наклон поверхности для разных участков колеблется от 0,5 (это довольно ровная поверхность) до 6°.

Венера более однородна: для нее коэффициент отражения колеблется в пределах 11–18%, что соответствует диэлектрической проницаемости от 4 до 6 и довольно тяжелым грунтам с плотностями от 2 до 3 г/см³. На Венере не наблюдались такие ровные участки, как на Марсе, — среднеквадратический наклон ее поверхности колебался от 2,5 до 5°.

Поверхность Меркурия оказалась очень похожей на лунную. Средняя «шероховатость» ее еще больше, чем у Венеры. Среднеквадратический наклон элементов рельефа Меркурия составляет $5-8^\circ$, что близко к аналогичному показателю для Луны — $6-7^\circ$. Коэффициент отражения от поверхности Меркурия равен $5,8-8,3\%$ при диэлектрической проницаемости $2,7-3,3$; соответствующие параметры лунной поверхности — $5,7-6,3\%$ и $2,6-2,8$. Плотности грунта у этих небесных тел также близки по своей величине: $1,2-1,6 \text{ г/см}^3$ для Меркурия и $1,2-1,3 \text{ г/см}^3$ для Луны.

Посылаемый радиолокатором сигнал отражается различными частями поверхности планеты. В результате обратно приходит множество наложенных друг на друга сигналов. Каждый из них идентичен посланному, но имеет немного другое запаздывание, так как дальности до различных частей планеты разные. Кроме того, одни сигналы отражены надвигающимися на нас из-за вращения планеты участками ее поверхности, и частота их колебаний будет выше; другие — удаляющимся от нас, и частота их колебаний будет меньше. Благодаря этому удается путем математической обработки разделить сигналы, отраженные от различных участков, и, зарегистрировав их интенсивность, получить картину распределения яркости отражения по поверхности. Таким образом, удается получить пока что грубую картину поверхности Венеры сквозь облака.

Несколько слов о космическом локаторе, используемом нами. В качестве антенны, направляющей на планету электромагнитные колебания и принимающей отраженные от нее колебания, с 1979 г. используется новая большая параболическая антенна Центра космической связи в Крыму (рис. 4). Диаметр ее параболоида 70 м. Он может поворачиваться в любую сторону и устанавливаться в заданном направлении с точностью в несколько угловых секунд.

Небольшая антенна, излучающая радиоволны, помещена на конусе, закрепленном в центре большого параболоида. Она облучает малое зеркало, помещенное в районе фокуса этого параболоида. Отраженные от зеркала волны падают на большой параболоид и, отражаясь от него в виде параллельного пучка, направляются вдоль оси параболоида в пространство, благодаря концентрации излучаемой энергии в узком пучке на этой антенне достигается — на волне 40 см, на которой мы работаем, — увеличение плотности энергии в желаемом направлении примерно в 200 тыс. раз. В результате от мощного передатчика радиолокатора на поверхность Венеры удается передать несколько сотен ватт при минимальном расстоянии до Венеры и несколько ватт — при максимальном. Примерно 10% этой мощности идет на отраженные сигналы, рассеиваемые в разные стороны. Очень небольшая часть их энергии попадает обратно на большой параболоид локатора, который концентрирует ее на малом зеркале, а последнее отражает на приемную антенну.

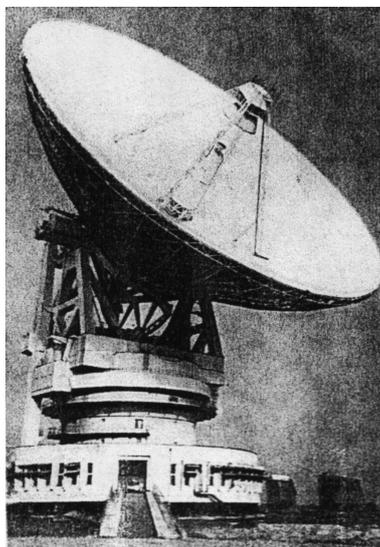


Рис. 4.

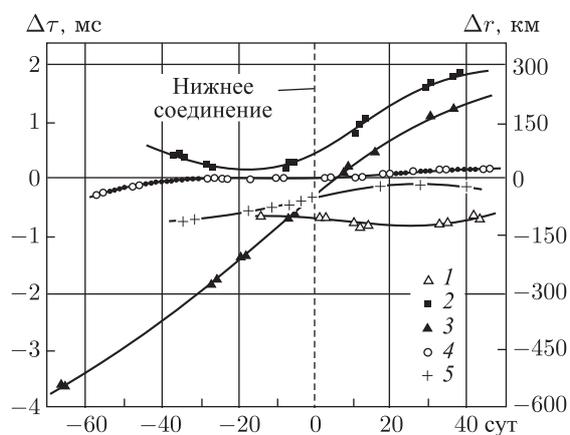


Рис. 5. Приемопередающая полноповоротная антенна диаметром 70 м Центра дальней космической

Полная высота антенны примерно 80 м, то есть равна высоте 30-этажного дома.

Уникальная особенность большого параболоида локатора заключается в том, что при своих громадных размерах он выполнен с точностью, превышающей 1 мм, и сохраняет ее при изменении действующих на него усилий ветра, а также при движении параболоида вокруг горизонтальной оси. В последнем случае он может несколько деформи-

роваться, но будет сохранять заданную форму с требуемой точностью. Это позволяет очень эффективно работать с антенной на волнах длиной от 1 см и более.

Частота мощного передатчика, подающего энергию высокочастотного колебания в антенну, менялась по специально рассчитанной программе так, чтобы при приеме можно было разделить сигналы, отраженные от разных участков планеты, путем не очень сложных математических преобразований на ЭВМ. Частота передатчика и закон ее изменения поддерживались с точностью, большей, чем 10^{-12} номинала, водородным стандартом частоты. Это позволило обеспечить приведенные выше точности измерения расстояний и скоростей.

Приемное устройство локатора чрезвычайно чувствительно. В нем сигнал сначала усиливается парамагнитным усилителем (мазером) на кристалле рубина, охлажденном жидким гелием до температуры 4 К (-269° С), а потом идет уже на обычные усилители. Чувствительность локатора такова, что он может с достоверностью 0,999 зарегистрировать сигнал с энергией 10^{-20} Дж. Это энергия настолько малая, что ее трудно себе представить. Такая энергия необходима, чтобы поднять частичку тумана диаметром в 1 мкм на высоту 1 мкм. Эта малая энергия собирается гигантским параболоидом антенны локатора, передается на приемник и надежно регистрируется и анализируется.

Передатчик и большая параболическая антенна космического локатора были созданы нашей промышленностью и используются для связи с космическими аппаратами. Большая параболическая антенна используется также как мощный радиотелескоп для различных радиоастрономических наблюдений. Устройство формирования специального для радиолокации сигнала, чувствительный приемник радиолокатора и аппаратура обработки радиолокационного сигнала были созданы в Институте радиотехники и электроники АН СССР.

При измерениях локатор излучал сигнал в течение времени, необходимого для того, чтобы электромагнитные волны дошли до планеты и вернулись обратно. После этого, чтобы не мешать приему вернувшихся очень слабых сигналов, передатчик выключался, отключался от антенны и к ней подключался приемник. Это время при локации Венеры менялось от 4,5 до 29 мин., а для Марса доходило до 45 мин. Затем столько же времени производился прием, после чего снова включался передатчик, и т. д.

Мы привыкли считать, что скорость света — это чрезвычайно большая скорость, которую нельзя превзойти и ощутить можно только с помощью особых приборов. При радиолокации планет приходится десятки минут с нетерпением ждать, пока, наконец, не вернется посланный на планету сигнал и можно будет начать его регистрировать и извлекать из него информацию. При этом ожидании начинает казаться, что скорость света не столь уж велика, и было бы неплохо, если бы электромагнитные волны распространялись побыстрее.

Я рассказал про одну сравнительно узкую область радиоэлектроники, достижения в которой позволили получить в течение последних 20 лет поразительные результаты, коренным образом изменившие наши сведения о движении планет Солнечной системы, которое изучалось другими методами в течение веков.

Можно было привести еще очень много подобных примеров. Уверен, что радиоэлектроника благодаря достигнутым точностям, чрезвычайной чувствительности создаваемых приборов, методам управления очень быстро протекающими процессами, а также созданными ею способами быстрой передачи и обработки информации еще многое даст человечеству. Что можно ожидать в развитии радиоэлектроники в ближайшие годы?

Радиоэлектроника пережила несколько этапов в своем развитии, и каждый этап характеризовался использованием новых физических процессов, открывавших дополнительные возможности для техники и расширявших области ее применения.

Первый этап — от изобретения радио А. С. Поповым в 1895 г. до использования электронных вакуумных приборов — продлился примерно 30 лет. Возможности радиоэлектроники были очень ограничены, существовала только радиотелеграфия.

Второй этап длился примерно 25 лет. Он был обусловлен широким развитием вакуумной электроники. Появилась радиотелефония, радиовещание, телевидение, радиолокация, радионавигация. Радиоэлектроника стала широко использоваться во многих областях науки и техники.

Третий этап, начавшийся в 50-х годах, связан с появлением, бурным развитием и широким использованием твердотельных полупроводниковых электронных приборов. Они стали вытеснять электровакуумные приборы, упрощая и удешевляя радиоаппаратуру, повышая ее надежность. Они позволили создать современные ЭВМ, вносящие существенный вклад в самые различные области человеческой деятельности и служащие базой для дальнейшей автоматизации производственных процессов и повышения производительности труда.

Сейчас наступает четвертый этап, о котором я хочу сказать несколько слов. Он, очевидно, будет характеризоваться широким использованием волоконно-оптических линий для передачи электромагнитных волн. Уже созданы кварцевые волокна, по которым можно передавать световые сигналы на расстояния большие, чем 10 км, после чего они могут быть усилены и переданы дальше практически без искажений. По этим волокнам свет идет, следуя за изгибами волокна, отражаясь от его внешних отражающих слоев, сделанных с меньшим показателем преломления, чем средняя его часть. Диаметр такого волокна порядка 0,1–0,2 мм.

Оптическое волокно позволяет передавать намного большее количество информации по сравнению с медным кабелем, радикально уменьшить вес и объем соединительных проводов, устранить помехи,

возникающие в проводах от электромагнитных полей различных аппаратов и соседних проводов, сэкономить медь, упростить ряд приборов. Волоконные оптические линии очень хорошо сочетаются с твердотельной электроникой и применяющимися в ней методами миниатюризации. Как пример, на рис. 5 представлены разрезы существующего ВЧ-кабеля, служащего для передачи четырех телевизионных программ, и волоконного, способного передать 100 телевизионных программ, причем на большее расстояние. Как видно, преимущество волокна огромно. Уже ясно, что оптическое волокно будет широко использоваться для передачи сигналов как на очень большие, так и на малые расстояния.

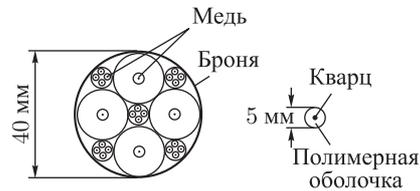


Рис. 6. Сравнение поперечных разрезов и некоторых характеристик ВЧ-кабеля и световодного кабеля. Слева — существующий ВЧ-кабель (4 телевизионных канала, вес 3000 кг/км), справа — световодный кабель (100 телевизионных каналов, вес 30 кг/км)

Сейчас во многих странах проводится интенсивная работа по совершенствованию оптического волокна, технологии его производства, расширению областей его применения. В СССР инициатором этих работ стала Академия наук. В ее институтах — Физическом институте им. П. Н. Лебедева, Институте химии, Институте радиотехники и электроники была разработана наша технология получения оптического волокна с малыми потерями и методы его использования. Сейчас эти работы интенсивно продолжаются при широком участии промышленности.

В заключение хочу выразить полную уверенность, что радиоэлектроника, как всегда быстро подхватывая новейшие достижения фундаментальной науки, будет продолжать развиваться у нас опережающими темпами, создавая новые прогрессивные технические средства для нашего народного хозяйства, обороны, медицины, науки и культуры.