

РОССИЙСКАЯ АКАДЕМИЯ НАУК  
ИНСТИТУТ РАДИОТЕХНИКИ И ЭЛЕКТРОНИКИ

# ПЛАНЕТНЫЙ РАДИОЛОКАТОР

(РАЗДЕЛ ТЕХНИЧЕСКИХ ПРЕДЛОЖЕНИЙ)

## Содержание

Введение	2
Исходные данные	4
Планеты земной группы	5
Спутники внешних планет	9
Астероид Таутатис	10
Исследования околоземного космического мусора	12
Функциональная схема радиолокатора	14
Антенная система	15
Доплеровский синтезатор	17
Синтезатор ЛЧМ-сигнала	18
Хронизатор	19
Особенности устройства обработки	20
Заключение	21
Литература	22

Главный научный сотрудник ИРЭ РАН

О. Н. Ржига

Главный научный сотрудник ИРЭ РАН

А. Л. Зайцев

## Введение

Радиолокационная астрономия – специальный раздел наблюдательной астрономии. Основное её отличие от астрономии состоит в том, что если там исследуется отражённое небесным телом солнечное излучение, то здесь – посланное с Земли и отражённое небесным телом радиоизлучение. Мощность принятого радиосигнала падает пропорционально четвёртой степени расстояния до исследуемого объекта. Поэтому при маломощном входном усилителе антенна должна иметь, по возможности, большую эффективную площадь, а передатчик – максимальную мощность.

В отличие от классической астрономии радиолокационная астрономия – сравнительно новое направление. Радиолокация Луны была начата в 1945 г. Первая успешная радиолокация планеты Венеры была осуществлена в 1961 г. одновременно в США, Великобритании<sup>1</sup> и Советском Союзе [1-3].

В Советском Союзе для радиолокации Венеры использовались антенна АДУ-1000, передатчик (рабочая длина волны 39 см) и задающий генератор, стабилизированный кварцем, радиосистемы «Плутон», которая создавалась тогда СКБ-567 в Крыму под Евпаторией<sup>2</sup>. Остальные системы, включая анализатор для выделения слабого отражённого сигнала, были разработаны в Институте радиотехники и электроники (ИРЭ) АН СССР и созданы в виде макетов [7]. С 1980 г. для радиолокации небесных тел в Центре дальней космической связи используется антенна РТ-70 радиосистемы «Квант-Д». Через несколько лет радиолокатор был переведён с волны 39 см на 6 см и водородный стандарт частоты.

Непосредственной причиной, создавшей условия для проведения радиолокационных исследований планет, были планировавшиеся тогда С.П.Королёвым полёты межпланетных станций к Венере и Марсу. Чтобы избежать промаха, положение планеты в картинной плоскости в момент подлёта межпланетной станции должно быть известно с погрешностью не более величины её радиуса. Все расстояния в Солнечной системе выражаются через астрономическую единицу – среднее расстояние Земли от Солнца. До проведения радиолокационных измерений наиболее достоверным считалась величина астрономической единицы, определённая Е.Рабе по наблюдениям движения малой планеты Эрос с 1926 г. по 1945 г. [8]. Как оказалось впоследствии, определение Е.Рабе содержало ошибку, которая при полёте к Венере привела бы к промаху в 3 её радиуса.

---

<sup>1</sup> В США первые опыты по радиолокации Венеры были начаты в 1958 г. [4], но там за отражённый сигнал был принят шумовой выброс. В Великобритании отражённый сигнал пытались обнаружить в 1959 г. с помощью 76-метрового радиотелескопа обсерватории Джодрел-Бенк [5], но из-за ошибки в эфемеридах, которые вычислялись в США на основе эксперимента 1958 г., он был пропущен.

<sup>2</sup> Параметрический входной усилитель был разработан также в СКБ-567 на основе входного усилителя системы «Плутон». Затем, с 1962 г. при радиолокации планет использовался парамагнитный усилитель, разработанный в ИРЭ А.В.Францессоном [6].

В дополнение к угломерным астрометрическим измерениям радиолокационный метод дал возможность измерять с высокой точностью расстояние до небесного тела, которое получается как непосредственно измеряемое запаздывание отражённого сигнала, умноженное на скорость распространения радиоволны (скорость света). Согласно радиолокационным измерениям, величина астрономической единицы равна  $149.597.868 \pm 0,6$  км. Это определение имело исключительное значение для полётов межпланетных станций, поскольку уточнение астрономической единицы уточняло все расстояния в Солнечной системе.

На первом этапе для определения астрономической единицы использовались также измерения доплеровского смещения частоты отражённого сигнала. Они дают однозначную величину (измерения запаздывания, использующие модулированный сигнал, имеют неоднозначность, определяемую периодичностью сигнала). Однако точность измерений доплеровской частоты ниже.

Полёты советских межпланетных станций сопровождалось проведением радиолокационных измерений расстояния до планеты-цели. Регулярные радиолокационные измерения расстояния до планет были использованы для создания единой релятивистской теории их движения [9], с помощью которой прогнозируется положение планеты в момент сближения с ней и посадки межпланетной станции.

Радиолокационный метод непосредственно даёт расстояние до ближайшей точки, находящейся в центре "видимого" диска планеты. С другой стороны, положение центра планеты известно из эфемерид. Их разность есть величина местного радиуса планеты. Таким способом измерялся рельеф поверхности Венеры и Марса [10, 11].

Возможность спектральных измерений в астрономии определяется естественной шириной спектральных линий солнечного спектра. В отличие от этого спектр радиопередатчика может быть очень узким. Видимое вращение небесного тела вызывает доплеровское расширение спектра отражённого сигнала, которое несёт информацию о его скорости. Измерение вариаций ширины доплеровского спектра отражённого сигнала позволило установить период и направление вращения Венеры, поверхность которой закрыта сплошным облачным слоем. Оказалось, что Венера вращается в обратную сторону по сравнению с другими планетами, делая один оборот за 8 земных месяцев [12, 13].

Дальнейшее уточнение периода вращения Венеры велось путём отслеживания частотного перемещения деталей спектра отражённого сигнала, обусловленных областями поверхности Венеры с более высокой отражательной способностью [14, 15]. В пределах погрешности измерений, лежит тот случай, когда в каждом нижнем соединении (сближении с Землей), Венера обращена к Земле одним и тем же полушарием. Номинальная оценка соответствует тому, что требуется 700 лет, чтобы она повернулась к Земле обратным полушарием.

Измерение вариаций ширины доплеровского спектра отражённого сигнала было использовано также для определения периода вращения планеты Мер-

курий. Было найдено, что её период составляет  $2/3$  от периода обращения планеты вокруг Солнца и равен 59 земным суткам [16].

Разделение отражённых сигналов одновременно по времени их запаздывания и доплеровской частоте (дальноностно-доплеровский метод) позволило получить грубую карту поверхности Венеры [17]. Более детальные изображения и карты Венеры были получены с помощью советских космических аппаратов «Венера-15» и «Венера-16» [18] (создан первый «Атлас поверхности Венеры» [19]), а также американского «Магеллан» [20].

Радиус досягаемости современных планетных радиолокаторов ограничен пределами Солнечной системы. Однако их чувствительность достаточна, чтобы кроме планет земной группы<sup>3</sup>, наблюдать спутники Марса [21], галилеевы спутники Юпитера<sup>4</sup> [22], а также кольца Сатурна [23] (на пределе досягаемости современных радиолокационных установок наиболее крупный спутник Сатурна – Титан [24]). Сами планеты-гиганты, по современным представлениям, закрыты плотной атмосферой, с глубиной переходящей из газообразного состояния в жидкое без резкой границы, и не отражают радиоволн.

В пределах досягаемости современных радиолокаторов малые планеты [25], ядра комет [26] и сближающиеся с Землёй астероиды, для которых дальноностно-доплеровским методом были получены изображения с пространственным разрешением в десятки метров [27]. Ещё одним применением радиолокации является исследование околоземного космического мусора, состоящего из остатков потерявших управление искусственных спутников Земли и последних ступеней ракет-носителей, выведивших их на орбиту [28, 29].

После развала Советского Союза Центр дальней космической связи вместе с аппаратурой планетного радиолокатора оказался на территории Украины. В этот период наиболее активно радиолокационными исследованиями занимался А.Л.Зайцев, которому удавалось получить для этого небольшое финансирование от зарубежных партнёров. Помимо измерения расстояния до Венеры, совместно с зарубежными учёными были проведены исследования трёх астероидов [30-33]. В частности, для астероида Таутатис были измерены отражательные характеристики и период вращения. Раздвоенная форма спектра эхосигнала указывает на то, что астероид имеет гантелевидную форму.

### Исходные данные

На территории Российской Федерации осталась антенна РТ-70 на Дальнем Востоке под Уссурийском (рис.1). Это полноповоротная зеркальная антенна с диаметром главного зеркала 70 м. По своим характеристикам она отвечает требованиям современного планетного радиолокатора. Для продолжения в России радиолокационных исследований планет её следует оборудовать достаточно мощным передатчиком. Исходные данные для нового планетного радиолокатора приведены в табл.1.

<sup>3</sup>Планеты Меркурий, Венера, Марс.

<sup>4</sup>Наибольшие спутники Юпитера: Ио, Европа, Ганимед, Калистою



Рис.1. Антенна РТ-70 под Уссурийском с диаметром главного зеркала 70 м.

Таблица 1

Исходные данные для нового планетного радиолокатора  
(представлены сотрудниками Российского НИИ  
космического приборостроения)

1. Диаметр главного зеркала антенны, м	70
2. Рабочая частота, МГц	8510
3. Рабочая длина волны, см	3,523
4. Эффективная площадь поверхности антенны:	
- передача, м <sup>2</sup>	2600
- приём, м <sup>2</sup>	2500
5. Мощность передатчика в непрерывном режиме, кВт	больше 300
6. Поляризация антенны в режиме "передача"	Прав. кругов.
7. Время переключения между режимами "передача" и "приём", с	около 0,5
8. Развязка трактов, дБ	больше 35
9. Шумовая температура приёмника и антенны:	
- в режиме правой поляризации, К	ниже 20
- в режиме левой поляризации, К	ниже 30
10. Координаты пункта:	
- долгота	132°
- широта	44°

### Планеты земной группы

Возможность изучения небесного тела и его характеристик радиолокационным методом определяется, в первую очередь, уровнем отражённого сигнала

по отношению к флуктуационному шуму, которое зависит от положения планеты относительно Земли в период радиолокации (рис.2). Изменение углового положения планеты  $\theta$  относительно направления Солнце-Земля при движении планеты приводит к изменению расстояния (рис.3)<sup>5</sup>.

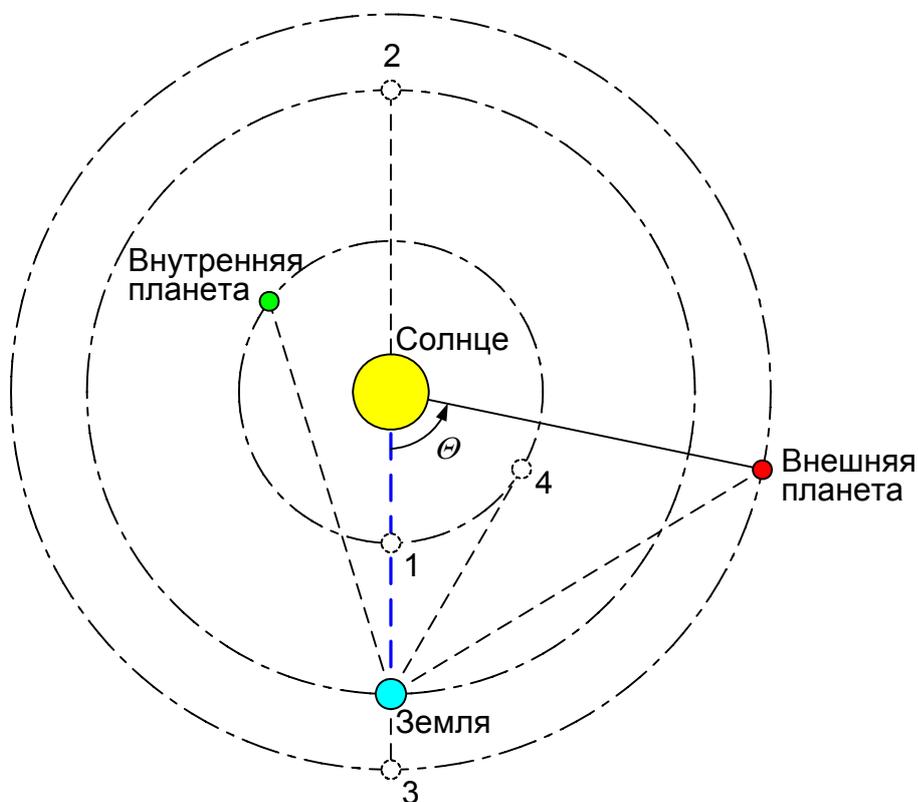


Рис.2. Конфигурации планет: 1 – нижнее соединение; 2 – верхнее соединение; 3 – противостояние; 4 – элонгация.

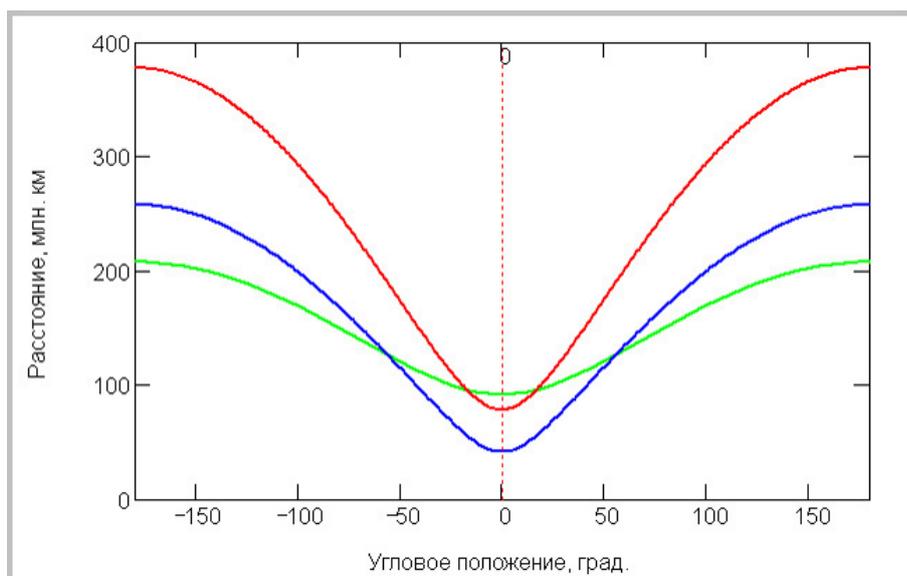


Рис.3. Изменение расстояния между Землёй и планетой в зависимости от её углового положения  $\theta$ :  
-зелёная линия – Меркурий;  
-синяя линия – Венера;  
-красная линия – Марс.

<sup>5</sup> Предполагается, что орбиты Земли и планет лежат в одной плоскости и являются концентрическими окружностями.

Для планет земной группы (Меркурий, Венера и Марс) изменение отношения мощности отражённого сигнала к мощности шума антенны и приёмника в зависимости от угла  $\Theta$  показано на рис.4. Параметры радиолокатора соответствуют данным табл.1.

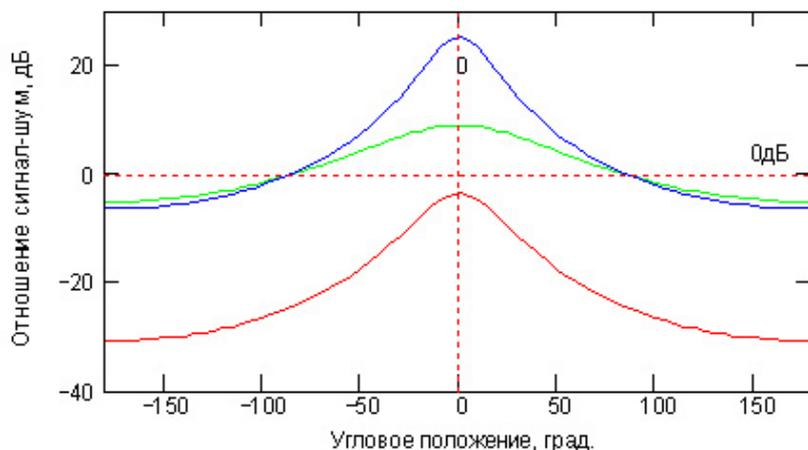


Рис.4. Изменение отношения сигнал-шум (дБ) в зависимости от углового положения планеты  $\Theta$ . Обозначение линий — см. рис.3.

Вращение планеты приводит к расширению частотного спектра монохроматического сигнала при отражении (рис.5). Предполагается, что для ограничения полосы частот флуктуационного шума используется квази-согласованный фильтр, частотная характеристика которого повторяет спектр мощности отражённого сигнала (см. ниже).

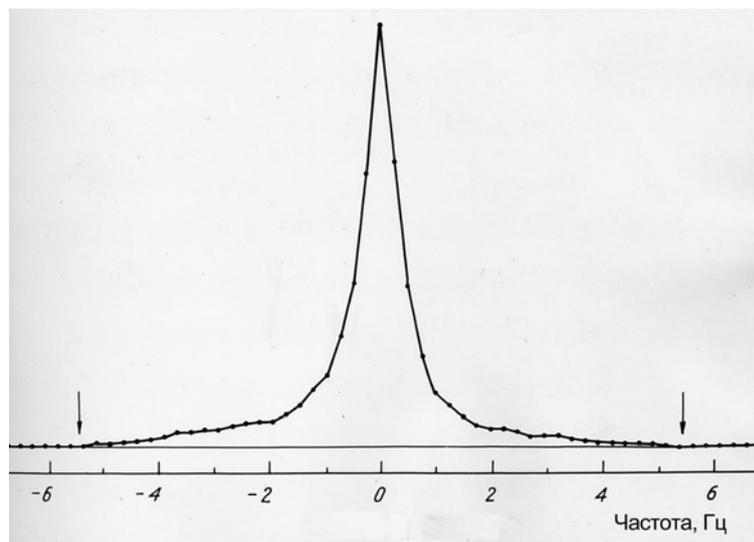


Рис.5. Частотный спектр отражённого Венерой сигнала на волне 39 см [34]. Частотное разрешение 0,244 Гц. Время некогерентного накопления 160 мин. Вертикальные стрелки указывают границы спектра.

Поверхность Венеры закрыта плотной атмосферой, которая вызывает поглощение отражённых волн. Это поглощение резко растёт при укорочении длины волны сигнала (рис.6). На рабочей длине волны поглощение достигает 11 дБ (при двукратном прохождении). Соответственно падает мощность отражённого сигнала.

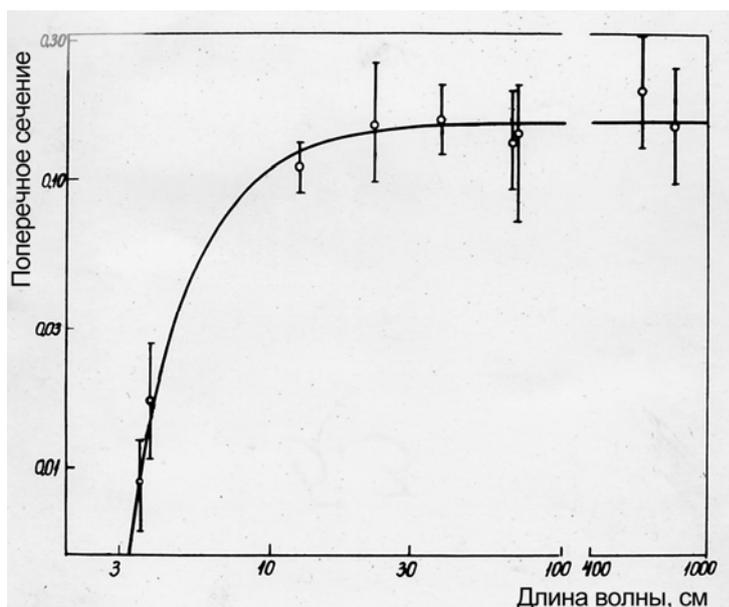


Рис.6. Спектральная зависимость отражательной способности Венеры. Источник резкого уменьшения отражательной способности в сантиметровом диапазоне волн – молекулярное поглощение в газовых составляющих её атмосферы [34]. Масштаб – логарифмический.

Наибольший отражённый сигнал получается в нижнем соединении (для внешних планет в противостоянии), когда угол  $\theta = 0$  (см. рис.2). Как видно из рис.4, отношение сигнал-шум для Меркурия и Венеры лежит выше 1 не на всех участках орбиты, а для Марса, который вращается гораздо быстрее них и имеет сильно размытый спектр, оно вообще лежит ниже 1. Улучшение отношения сигнал-шум даёт некогерентное накопление энергии сигнала (после детектор). Отношение сигнал-шум для тех же планет при некогерентном накоплении сигнала в течение 1 часа показано на рис.7.

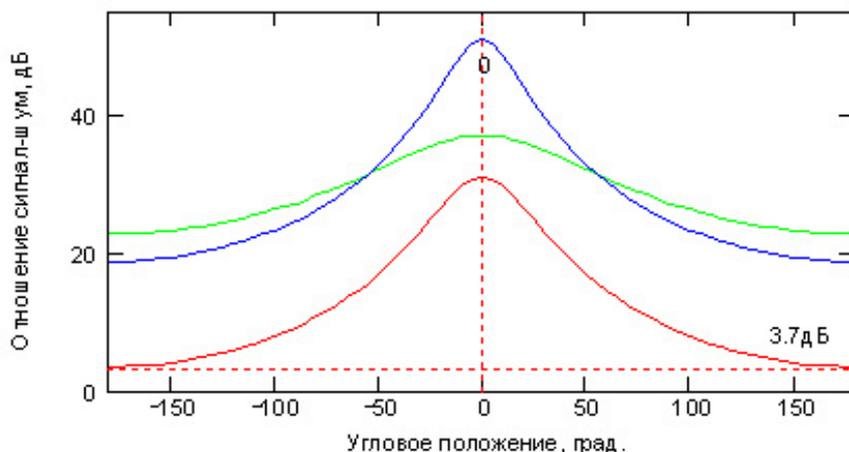


Рис.7. Изменение отношения сигнал-шум при использовании некогерентного накопления в течение 1 часа. Обозначение линий - см. рис.3.

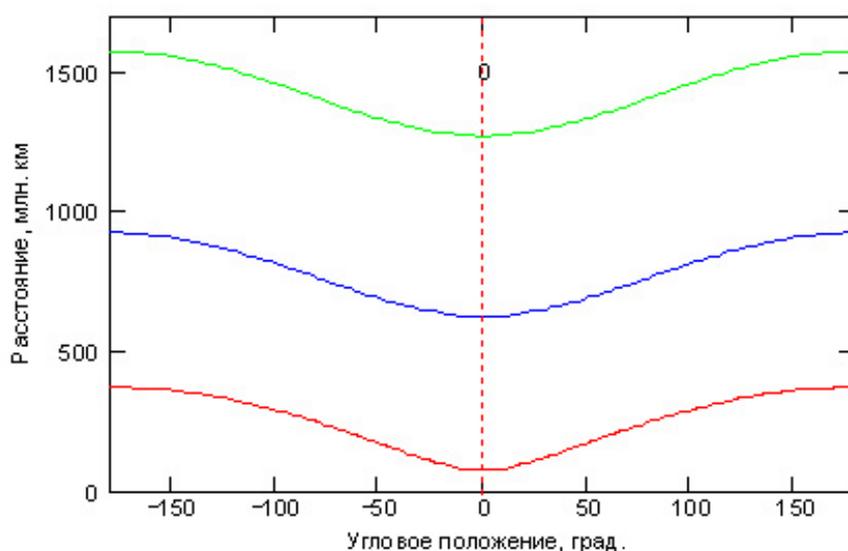
Некогерентное накопление даёт выигрыш в отношении сигнал-шум пропорционально  $\sqrt{T \cdot \Delta f}$ . Здесь  $T$  – время накопления,  $\Delta f$  – ширина полосы частот для флуктуационного шума.

Как видно из рис.7, длительное некогерентное накопление поднимает отношение сигнал-шум даже для Марса до 3-4 дБ на максимальной дальности.

Заметим, что отражённый сигнал имеет вид узкополосного флуктуационного шума и длительное некогерентное накопление снижает погрешность оценки его спектра.

### Спутники внешних планет

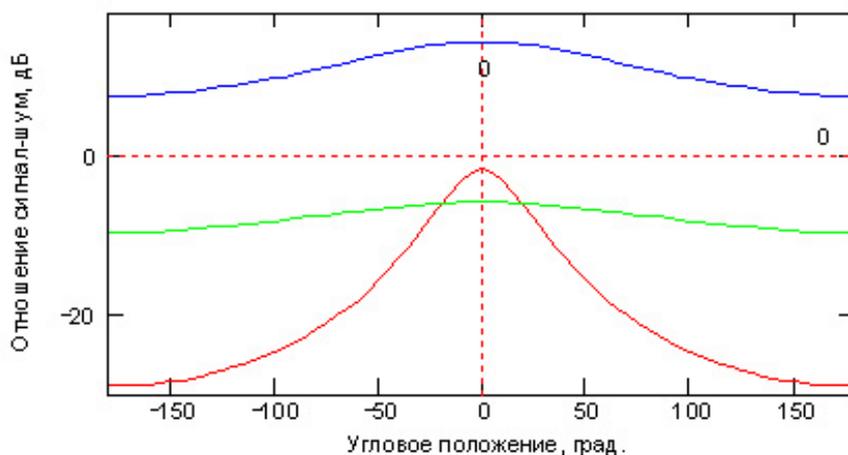
Радиолокационные наблюдения спутников больших планет (Юпитер, Сатурн), которые сами не отражают радиоволн, имеют не только научное значение, но и позволяют уточнить положение планет, вокруг которых они обращаются. Условия наблюдения спутников определяются их размером и расстоянием до материнской планеты (рис.8). Здесь рассмотрены характеристики Фобоса (спутник Марса), Ганимеда (спутник Юпитера) и Титана (спутник Сатурна).



*Рис.8. Изменение расстояния между планетой со спутником и Землёй в зависимости от углового положения планеты  $\Theta$ :*

*- красная линия - Фобос;  
- синяя линия - Ганимед;  
- зелёная линия - Титан.*

Изменение отношения сигнал-шум для этих небесных тел показано на рис.9. Из-за низкой величины этого отношения используется некогерентное накопление в течение 1 часа.



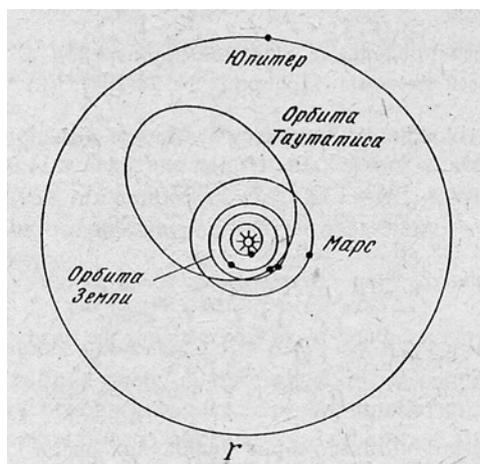
*Рис.9. Изменение отношения сигнал-шум для Фобоса, Ганимеда и Титана при использовании некогерентного накопления в течение 1 часа.*

*Обозначение линий - см. рис.8.*

Как видно из графика, выше шума поднимается только сигнал, отражённый Ганимедом. Для наблюдения Фобоса и Титана требуется более длительное некогерентное накопление.

### Астероид Таутатис

Орбиты большинства астероидов лежат в Главном поясе, который находится между орбитами Марса и Юпитера. Эти астероиды недоступны для радиолокационного наблюдения из-за большого расстояния. Однако часть астероидов имеет вытянутую орбиту, в перигелии проходящую вблизи орбиты Земли. Такие астероиды несут потенциальную опасность столкновения с Землей, и их наблюдение имеет принципиальную важность.



Здесь для анализа характеристик выбран астероид Таутатис, который в декабре 1992 г. приблизился к Земле на расстояние 3,6 млн. км. Орбита астероида среди других планет показана на рис.10.

Рис.10. Орбита астероида Таутатис [30].

$\gamma$  – направление на точку весеннего равноденствия.

В период сближения с Землей этот астероид наблюдался двухпозиционной системой Евпатория-Эфельсберг [30]. Изменение расстояния между астероидом и Землей в этот период показано на рис.11 (синяя линия). Для сравнения на этом же графике показано изменение расстояния до астероида, если бы он приблизился к Земле на 40 тыс. км (красная линия). Для изменения расстояния сближения менялся эксцентриситет орбиты.

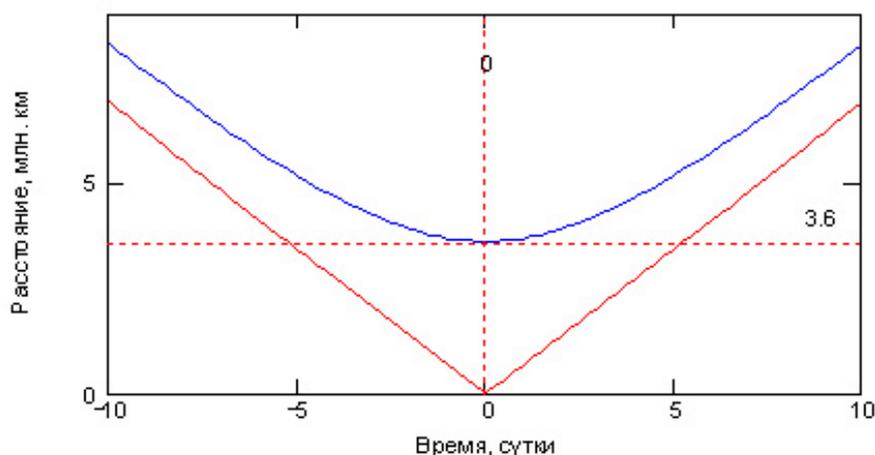
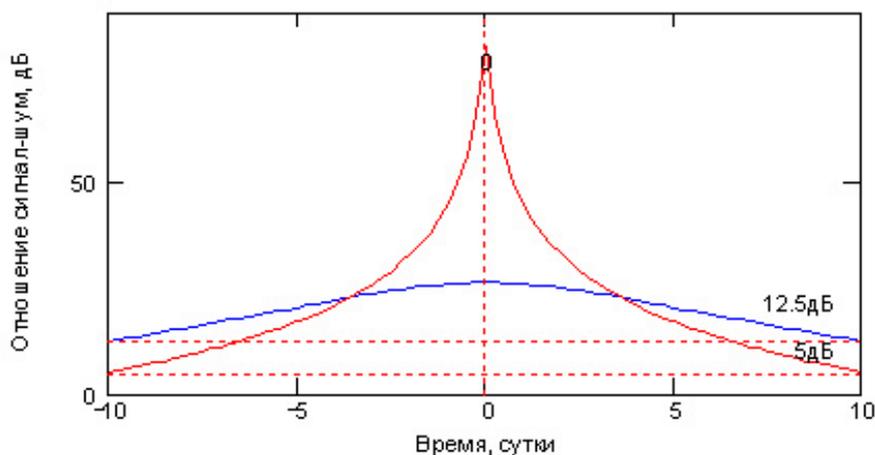
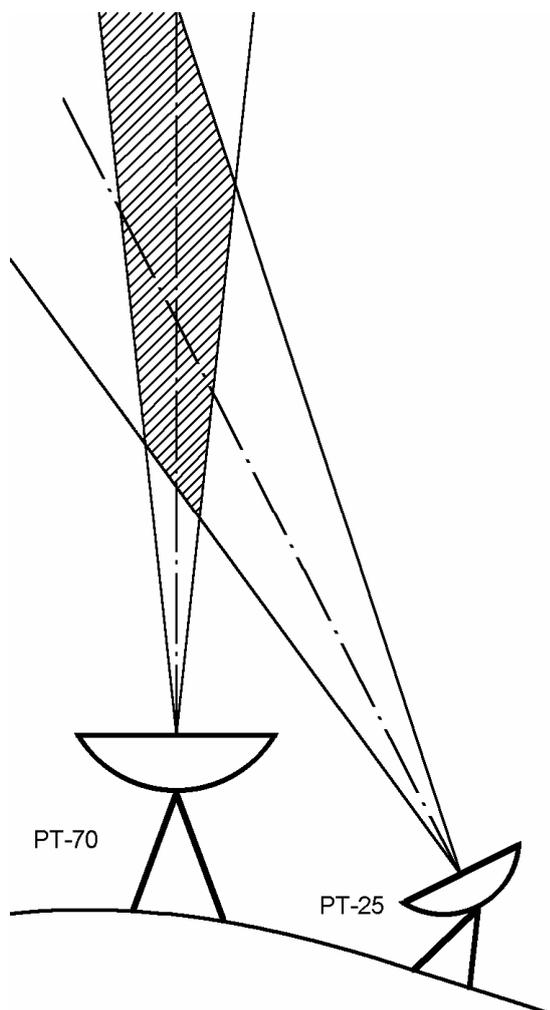


Рис.11. Изменение расстояния до астероида Таутатис: - синяя линия – минимальное расстояние 3,6 млн. км; - красная линия – минимальное расстояние 40 тыс. км.

Изменение отношения сигнал-шум при сближении показано на рис.12. Время распространения отражённого сигнала при сближении астероида с Землёй на 40 тыс. км составляет всего 0,27 с. Это меньше времени переключения радиосистемы из режима "передача" в режим "приём" (см. табл.1). Задачу можно решить, если перейти к двухпозиционному режиму и использовать для приёма отражённого сигнала отдельную антенну (рис.13).



*Рис.12. Изменение отношения сигнал-шум (дБ) в зависимости от времени. Обозначение линий - см. рис.11.*



*Рис.13. Двухпозиционная система: PT-70 – передающая антенна, PT-25 – приёмная. Общая для обеих лучей область заштрихована.*

Вторая антенна должна находиться за горизонтом, чтобы прямой сигнал передатчика не создавал помех приёму. Её эффективная площадь может быть много меньше площади основной антенны. Красный график рис.12 построен в предположении, что в качестве передающей антенны используется РТ-70, а в качестве приёмной – РТ-25 с эффективной площадью 200 м<sup>2</sup>. Как видно из рисунка, отношение сигнал-шум получается высоким, хотя радиус астероида всего 2 км [30].

### **Исследования околоземного космического мусора**

В настоящее время приобрело актуальность исследование околоземного космического мусора, состоящего из остатков потерявших управление искусственных спутников Земли и последних ступеней ракет-носителей, выводивших их на орбиту. Возможности обнаружения и слежения современных наземных средств (оптических и радиолокационных) ограничены размерами фрагментов 10 см на низких высотах и 1 м на геостационарной орбите [35].

В отличие от оптических наблюдений радиолокационный метод не зависит от времени суток и погодных условий. Хотя на радиоволнах нельзя обеспечить высокое угловое разрешение, когерентность излучённого сигнала позволяет измерять радиальную скорость и наклонную дальность объекта, что невозможно получить при оптических наблюдениях.

При достаточно высоком энергетическом потенциале радиолокатора обеспечивается обнаружение сигнала, отражённого объектом, поперечник которого много меньше длины волны. В этой области (области релеевского рассеяния) эффективная площадь обратного рассеяния прямо пропорциональна поперечнику объекта в шестой степени.

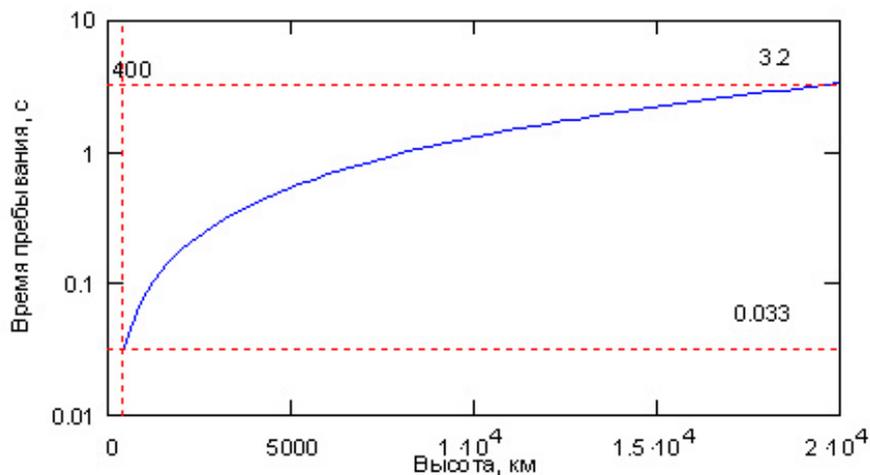
При наблюдении космического мусора время переключения антенны из режима "передача" в режим "приём" (см. табл.1) оказывается слишком большим. Так же, как и в случае наблюдения астероидов, сближающихся с Землёй, для приёма приходится использовать отдельную антенну (см. рис.13). На рисунке показан случай, когда передающая антенна направлена в зенит, а луч приёмной антенны ориентирован так, чтобы перехватить отражения из "освещённого" конуса.

Луч антенны РТ-70 на волне 3,5 см имеет ширину 2,2 угловых минуты. Время пребывания частицы, движущейся вокруг Земли, в "освещённом" конусе будет небольшим (рис.14). Как видно из графика, время пребывания изменяется от 0,033 с при высоте орбиты 400 км до 3,2 с при высоте 20.000 км (орбита взята круговой, вращение Земли не учитывается).

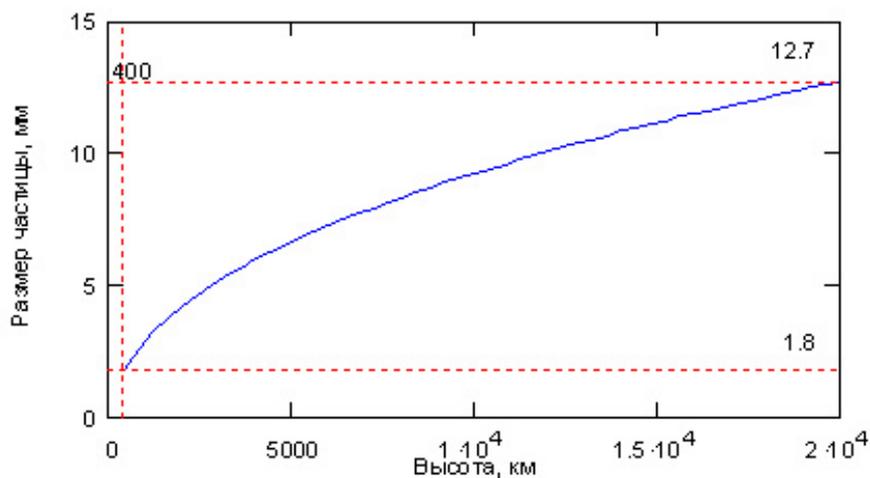
Минимальный размер обнаруживаемых частиц показан на рис.15. Он меняется от 2 мм на низкой орбите до 13 мм на высокой. Это много лучше, чем позволяют современные оптические и радиолокационные средства (см. начало этого раздела).

Можно показать, что при прохождении частицы через луч антенны доплеровская частота изменяется линейно. Производная частоты зависит от высо-

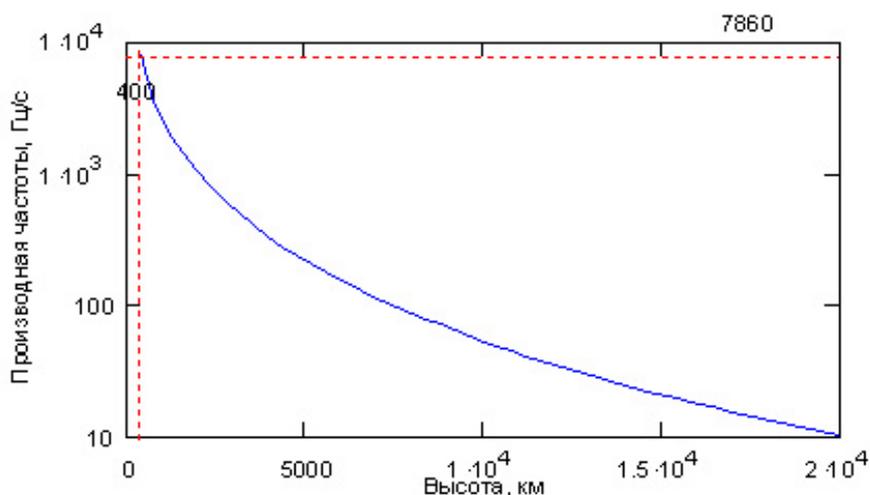
ты орбиты (рис.16). Как видно из графика, при высоте орбиты 400 км производная частоты равна 7860 Гц/с и 10 Гц/с при высоте 20.000 км. Эта зависимость может быть использована для определения высоты орбиты.



*Рис.14. Время пребывания частицы в главном лепестке диаграммы направленности антенны в зависимости от высоты её орбиты. Масштаб по вертикальной оси – логарифмический.*



*Рис.15. Минимальный размер обнаруживаемых частиц (мм) в зависимости от высоты их орбиты.*



*Рис.16. Изменение производной доплеровской частоты в зависимости от высоты орбиты частицы. Масштаб по вертикальной оси – логарифмический.*

### Функциональная схема радиолокатора

Функциональная схема планетного радиолокатора показана на рис.17.

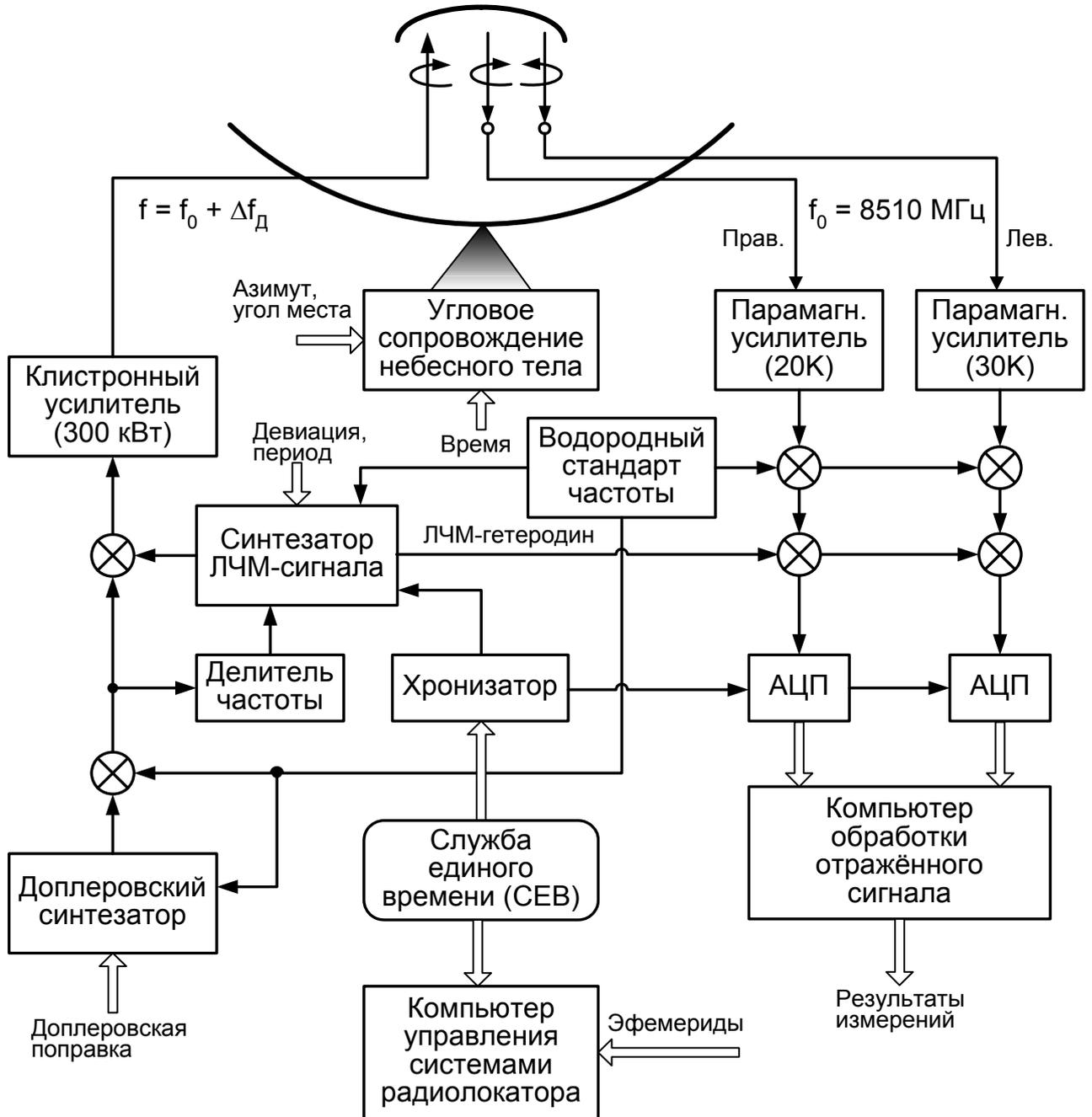


Рис.17. Функциональная схема планетного радиолокатора.

Планетный радиолокатор является когерентной системой. Все гармонические сигналы и импульсные последовательности формируются с помощью водородного стандарта частоты. Метки времени задаются службой единого времени (СЕВ).

Ниже рассмотрены требования к отдельным системам радиолокатора.

### Антенная система

Дальность действия радиолокатора, при равных прочих условия, прямо пропорциональна диаметру главного зеркала зеркально-параболической антенны. Минимум принимаемого шума обеспечивается касегреновским типом антенны. Конструкция антенны должна обеспечивать размещение мощного передатчика. В настоящее время на территории России этим требованиям лучше всего удовлетворяет антенна РТ-70, расположенная на Дальнем Востоке под Уссурийском. Использование антенны для целей радиолокации планет и космического мусора предъявляет к ней ряд специфических требований.

При зеркальном отражении от твёрдой поверхности планеты, масштаб неровностей которой много больше длины волны, направление плоскости поляризации изменяется на обратное. В то же время часть энергии отражается диффузно и сохраняет поляризацию. Соотношение энергий волн, отражённых зеркально и диффузно, для планет земной группы составляет примерно 10 : 1, а для колец Сатурна и покрытых льдом спутников больших планет – 1 : 1. В связи с этим антенна должна обеспечивать приём отражённого сигнала в обеих поляризациях.

Время перехода системы из режима "передача" в режим "приём" должно быть много меньше времени распространения сигнала до небесного тела и обратно к Земле. Это требование удовлетворяется при радиолокации планет, их спутников и астероидов на большом расстоянии. В то же время при серьёзном сближении астероида с Землёй, а также при радиолокации космического мусора, время распространения сигнала оказывается меньше времени перехода системы из одного режима в другой (см. табл.1) и для приёма приходится использовать вторую антенну, расположенную за горизонтом (см. выше).

Скорость распространения электромагнитных волн конечна. За время распространения сигнала небесное тело успевает изменить своё положение на угол  $\xi$  (рис.18).

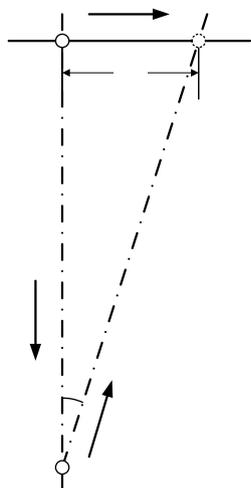


Рис.18. Аберрация при распространении радиоволн.

Это, так называемая, "абберация света". Из-за неё приём сигнала ведётся из видимого положения небесного тела, а излучение – в упреждённую точку.

Для различных небесных тел в разном положении абберация не одинакова (рис.19 – 21).

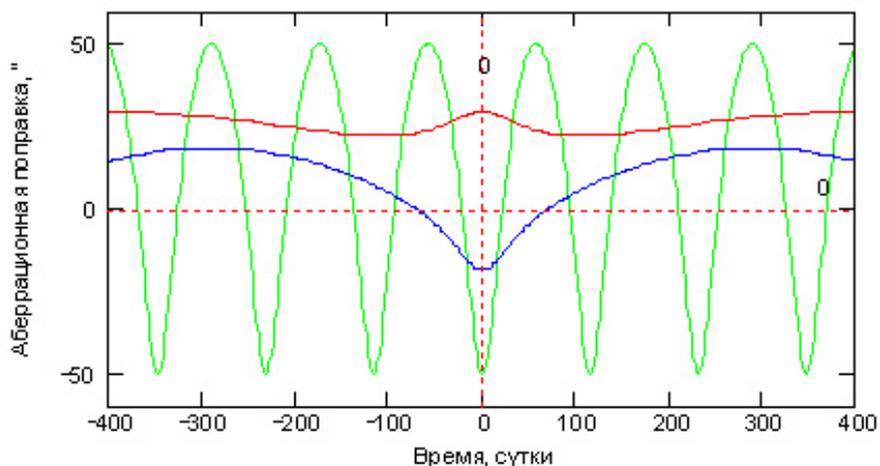


Рис.19. Абберационная поправка для планет земной группы (угловые секунды) в зависимости от времени. Обозначение линий – см. рис.3.

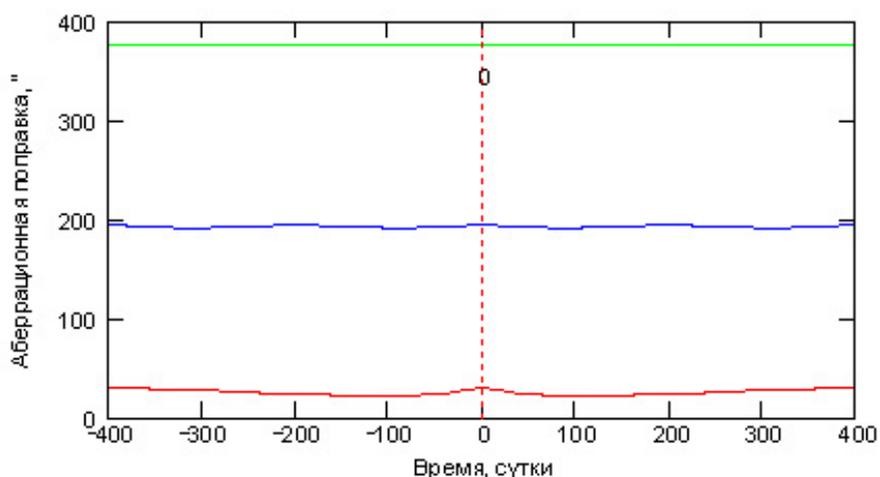


Рис.20. Абберационная поправка для планет со спутниками (угловые секунды) в зависимости от времени. Обозначение линий – см. рис.8.

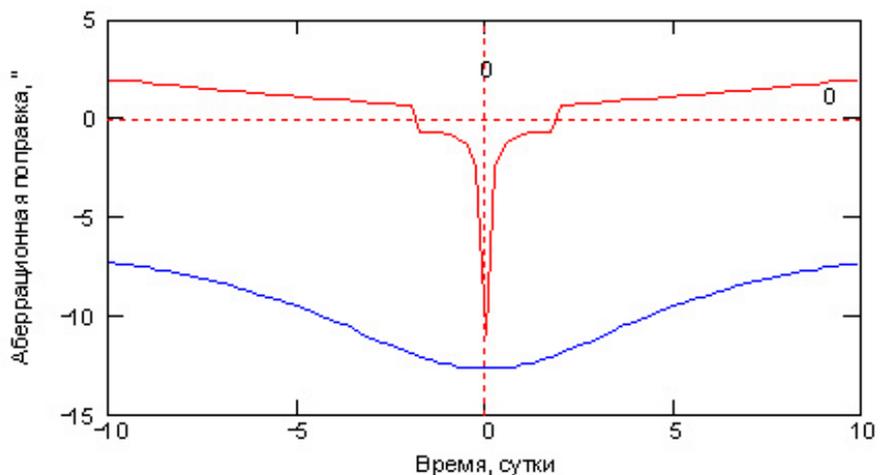


Рис.21. Абберационная поправка для астероида Таутатис (угловые секунды) в зависимости от времени. Обозначение линий – см. рис.11.

Для планет земной группы абберационная поправка имеет наибольшую величину для быстро движущегося Меркурия. Для него поправка лежит в пределах  $\pm 50$  угловых секунд. Для планет со спутниками абберационная поправка имеет наибольшую величину у далёкого Сатурна – 380 угловых секунд. Для астероидов, сближающихся с Землёй поправка не велика (см. рис.21). При исследовании космического мусора антенна вообще неподвижна.

### Доплеровский синтезатор

Движение небесного тела относительно антенны вызывает доплеровское смещение частоты отражённого сигнала. Особенностью предлагаемой структурной схемы является то, что расчётное значение доплеровского смещения компенсируется в сигнале передатчика ( $f_0 + \Delta f_D$ ), а приём ведётся на постоянной частоте  $f_0$  (см. рис.17). При этом в режиме приёма доплеровский синтезатор может быть выключен, чтобы не создавать дополнительных помех приёму слабого отражённого сигнала.

Крайние значения доплеровского смещения частоты определяются максимальными отклонениями радиальной составляющей скорости планеты относительно Земли, которые зависят от небесного тела (рис.22 – 24).

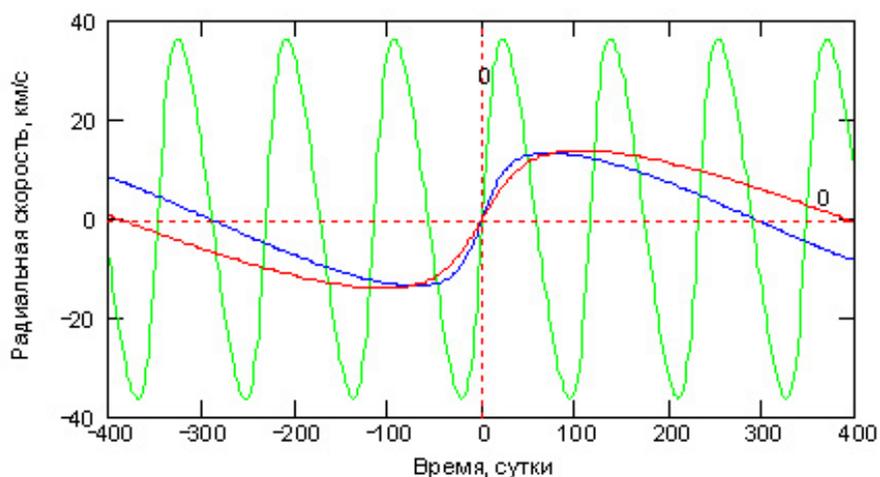


Рис.22. Радиальная составляющая скорости планеты относительно Земли. Обозначение линий – см. рис.3.

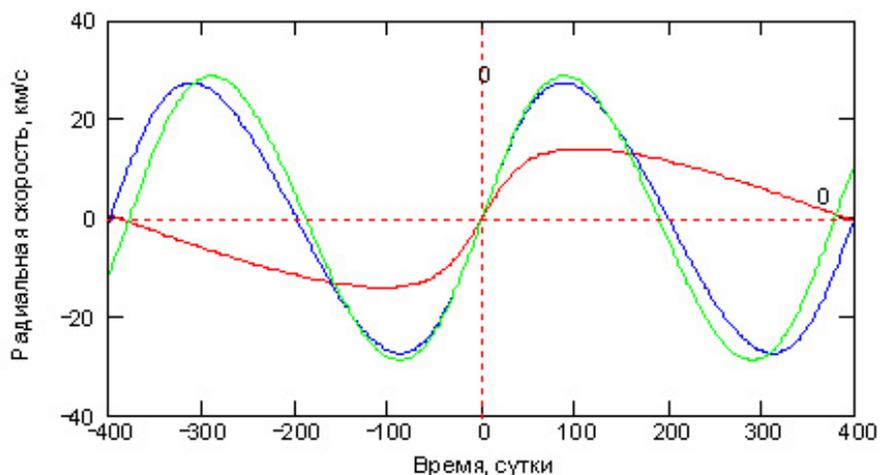
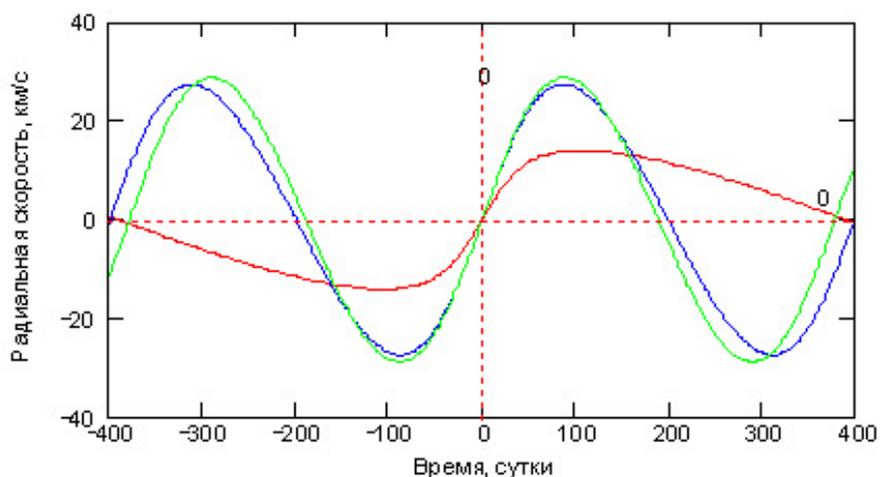


Рис.23. Радиальная скорость планеты со спутником относительно Земли. Обозначение линий – см. рис.8.



*Рис.24. Изменение радиальной составляющей скорости астероида Таутатис. Обозначение линий - см. рис.11.*

В таблице 2 приведены максимальные значения доплеровского смещения частоты отражённого сигнала и его производной при радиолокации различных небесных тел.

Таблица 2  
Максимальные значения доплеровского смещения частоты отражённого сигнала и его производной

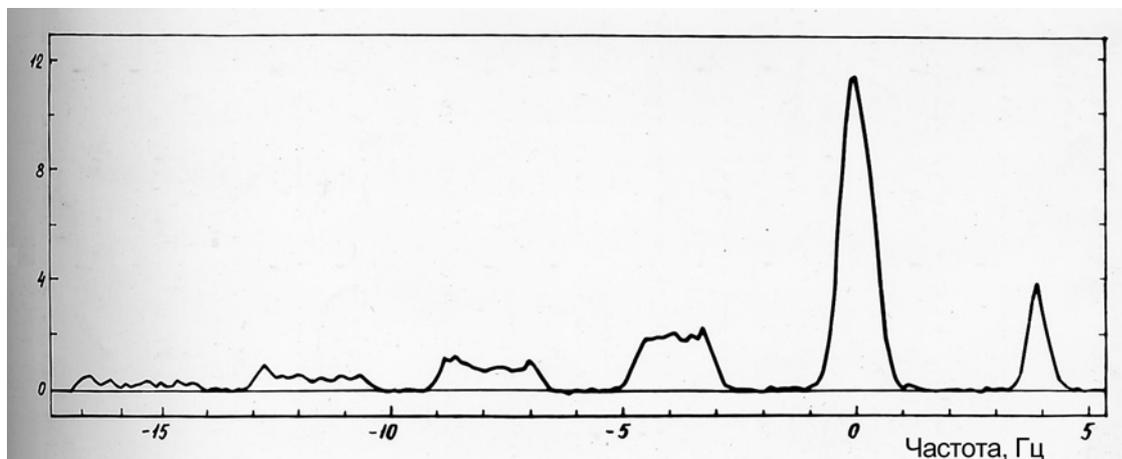
Небесное тело	Доплеровская частота, кГц	Производная частоты, Гц/с
1. Меркурий	2060	-2,1
2. Венера	750	-0,3
3. Марс	750	-0,2
4. Фобос	750	-0,2
5. Ганимед	1550	-0,4
6. Титан	1620	-0,4
7. Таутатис (3,6 млн. км)	420	-1,2
8. Таутатис (40 тыс. км)	450	-86

Как видно из этой таблицы, наибольшее значение доплеровской частоты получается при радиолокации Меркурия, а её производной – при критическом сближении астероида с Землёй.

### Синтезатор ЛЧМ-сигнала

При радиолокации планет в Центре дальней космической связи для измерения расстояния использовалась линейная частотная модуляция. Её достоинство в простоте свёртывания отражённого сигнала с копией зондирующего, которое осуществляется в одном из гетеродинов приёмника (см. рис.17). Для этого синтезатор ЛЧМ-сигнала запускается повторно, спустя прогнозируемое время распространения зондирующего сигнала. Небесное тело – цель протяжённая и спектр отражённого сигнала после свёртки имеет линейчатую структуру

(рис.25). В каждую линию попадают сигналы определённой дальности. Полоса частот, занятая свёрнутым сигналом, много меньше, чем полоса исходного (особенно при медленном вращении небесного тела, как Венера).



*Рис.25. Спектрограмма отражённого Венерой сигнала, полученная с применением линейной частотной модуляции (волна 39 см) [34].*

*Линия с максимальной энергией соответствует отражению от центральной области "видимого" диска планеты. Линии, расположенные левее, соответствуют отражениям от более удалённых кольцевых зон поверхности.*

Девиация зондирующего ЛЧМ-сигнала определяет разрешающую способность по дальности. Так, например, при девиации 1 МГц разрешение будет равно 150 м и, соответственно, при девиации 10 МГц – 15 м. С таким разрешением можно детально картографировать поверхность астероидов.

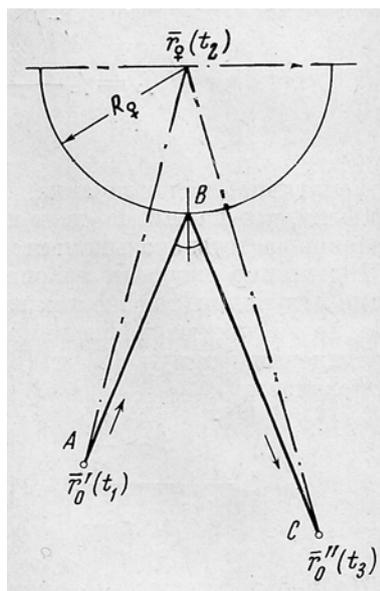
### **Хронизатор**

Принцип измерения запаздывания отражённого сигнала или его доплеровской частоты состоит в том, что измеряется не полная величина, а её отличие от прогнозируемого (заранее вычисленного) значения. Поэтому результат измерения может быть как положительным, так и отрицательным.

Хронизатор предназначен для того, чтобы в определённый момент, для которого рассчитаны целеуказания<sup>6</sup>, запустить модулятор. Вторично хронизатор запускает модулятор, спустя прогнозируемое время распространения сигнала.

На рис.26 показано, как происходит распространение сигнала при радиолокации планеты [36]. Этот процесс растянут во времени. В момент излучения  $t_1$  антенна находится в точке А, при отражении (точка В) положение планеты

<sup>6</sup> При радиолокации в Центре дальней космической связи целеуказания рассчитывались на каждую четвёртую минуту всемирного времени.



привязано к моменту  $t_2$ , в момент приёма сигнала  $t_3$  антенна оказывается в точке С.

Рис.26. Распространение сигнала при радиолокации планеты [36]:

*A* – антенна в момент излучения сигнала;

*B* – ближайшая к Земле область планеты в момент отражения;

*C* – антенна в момент приёма сигнала.

В течение сеанса радиолокации планета и антенна (вместе с Землёй) меняют своё положение в пространстве. Происходящее при этом изменение расстояния учитывается тем, что в исходную частоту, из которой формируется ЛЧМ-сигнал, вводится доплеровская поправка. Для этого служит дробно-частотный делитель (см. рис.17).

Изменение расстояния до небесного тела, определяющее запаздывание отражённого сигнала, показано на рис.3, 8 и 11. Величина запаздывания сигнала в нижнем соединении (противостоянии) и верхнем соединении дана в табл.3.

Таблица 3

Запаздывание сигнала

Небесное тело	Запаздывание, с	
	Нижнее соед. (противост.)	Верхнее соединение
1. Меркурий	612	1384
2. Венера	276	1720
3. Марс	523	2519
4. Фобос	523	-
5. Ганимед	4195	-
6. Титан	8520	-

Для обеспечения разрешения 15 м точность ввода прогнозируемой величины запаздывания должна быть лучше 0,1 мкс.

**Особенности устройства обработки**

Упрощенная функциональная схема устройства обработки отражённого сигнала приведена на рис.27 отдельно для удалённых небесных тел (А) и для космического мусора (В).

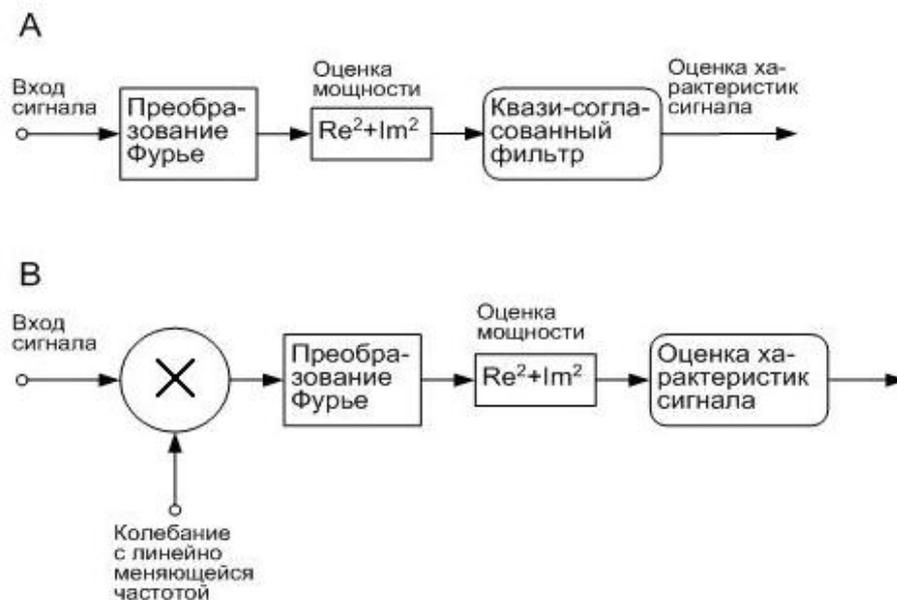


Рис.27. Функциональная схема устройства обработки:  
А - обработка сигнала удалённых небесных тел;  
В - обработка сигнала космического мусора.

В случае планет, их спутников и астероидов после спектрального анализа реализуется квази-согласованный фильтр<sup>7</sup>, частотная характеристика которого повторяет спектр отражённого сигнала (см. рис.5 и 25). Для космического мусора устройство обработки должно быть согласовано с отраженным сигналом по следующим параметрам:

- среднее значение доплеровской частоты;
- первая производная доплеровской частоты;
- длительность (время пребывания в луче).

Согласование по первой производной доплеровской частоты и длительности сигнала, характеризующих высоту орбиты частицы космического мусора и её эксцентриситет, реализуют последовательным перебором этих параметров.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Изложена история развития радиолокационных исследований планет, как в Советском Союзе, так и за рубежом. Очерчен круг задач астрометрии и астрофизики, которые могут выполняться с помощью радиолокации.
2. Выведены математические соотношения, которые описывают движение небесных тел вокруг Солнца. С помощью этих соотношений найдено, как изменяется расстояние и скорость небесных тел относительно Земли.

<sup>7</sup> Квази-согласованный потому, что реализуется не на несущей частоте, а после детектора.

3. Найдено, как будет изменяться отношение мощности отражённого сигнала к мощности флуктуационного шума для нового радиолокатора, исходные данные на который переданы Российским НИИ космического приборостроения.
4. Показано, что при использовании некогерентного накопления отражённого сигнала в течение 1 часа энергетический потенциал радиолокатора позволяет наблюдать планеты земной группы (Меркурий, Венера и Марс) на всей их орбите. В противостоянии Юпитера возможно наблюдать его галилеевы спутники (Ио, Калисто, Европа и Ганимед).
5. Показана возможность наблюдения сближающихся с Землёй астероидов. Однако при критическом сближении, когда время переключения антенны из режима "передача" в режим "приём" оказывается слишком большим по сравнению со временем распространения сигнала, для приёма отражённого сигнала необходимо использовать отдельную антенну, которая может быть на порядок меньшей эффективной площади, чем передающая РТ-70.
6. Отдельная антенна для приёма отражённого сигнала требуется и для наблюдения характеристик космического мусора. Минимальный размер обнаруживаемых частиц меняется от 2 мм на низкой орбите до 13 мм на высокой. Это много лучше, чем позволяют современные оптические и радиолокационные средства.
7. Представлена функциональная схема планетного радиолокатора. Описано назначение его отдельных узлов, определены специфические требования к ним.
8. Кратко описана функциональная схема цифрового устройства обработки.

### Литература

1. В.А.Котельников, В.М.Дубровин, В.А.Морозов, Г.М.Петров, О.Н.Ржига, З.Г.Трунова, А.М.Шаховской. Результаты радиолокации Венеры в 1961 г. *Радиотехн. и электрон.* **7**, № 11, 1860-1872 (1962).
2. J.H.Thomson, G.N.Taylor, J.E.Ponsonby, R.S.Roger. A new determination of the solar parallax by means of radar echoes from Venus. *Nature* **190**, No 4775, 519-520 (1961).
3. R.Price, G.H.Pettengil. Radar echoes from Venus and a new determination of the solar parallax. *Planetary Space Sci.* **5**, 71-74 (1961).
4. R.Price, P.E.Green, T.J.Goblik, R.H.Kingston, G.Kraft, G.H.Pettengil, R.Silver, W.B.Smith. Radar echoes from Venus. *Science* **129**, No 3351, 751-753 (1959).
5. I.V.Evans, G.N.Taylor. Radio echo observations of Venus. *Nature* **184**, No 4696, 1358-1359 (1959).
6. М.Е.Жаботинский, А.В.Францессон. Парамагнитный усилитель для планетного радиолокатора. *Радиотехн. и электрон.* **9**, № 1, 114-117 (1964).
7. В.А.Котельников, Л.В.Апраксин, В.О.Войтов, М.Г.Голубцов, В.М.Дубровин, Н.М.Зайцев, Е.Б.Коренберг, В.П.Минашин, В.А.Морозов, Н.И.Никитский, Г.М.Петров, О.Н.Ржига, А.М.Шаховской.

- Радиолокационная установка, использовавшаяся при радиолокации Венеры в 1961 г. *Радиотехн. и электрон.* 7, № 11, 1851-1859 (1962).
8. E.Rabe. Derivation of fundamental astronomical constants from the observations of Eros during 1926-1945. *Astron. J.* **55**, 112-126 (1950).
  9. М.Д.Кислик, Ю.Ф.Колюка, В.А.Котельников, Г.М.Петров, В.Ф.Тихонов. Единая релятивистская теория движения внутренних планет Солнечной системы. *Докл. АН СССР* **255**, № 3, 545-547 (1980).
  10. G.H.Pettengil, C.C.Counselman, L.P.Rainville, I.I.Shapiro. Radar measurements of Martian topography. *Astron. J.* **74**, 461-482 (1969).
  11. Ю.Н.Александров, А.С.Вышлов, В.М.Дубровин, А.Л.Зайцев, С.П.Игнатов, В.И.Каевицер, В.А.Котельников, А.А.Крымов, Г.М.Петров, О.Н.Ржига, А.Т.Тагаевский, А.Ф.Хасянов, А.М.Шаховской. Радиолокационные наблюдения Марса, Венеры и Меркурия на волне 39 см в 1980 г. *Докл. АН СССР* **255**, № 6, 1334-1338 (1980)
  12. R.M.Goldstein, R.L.Carpenter. Rotation of Venus: Period estimated from radar measurements. *Science* **139**, 910 (1963).
  13. O.N.Rzhiga. Radar Observations of Venus in the Soviet Union in 1962. *Life Sciences and Space Research II*, Amsterdam, North-Holland Co., 178-189 (1964).
  14. J.V.Evans, R.P.Ingals, L.P.Rainville, R.R.Silva. Radar observations of Venus at 3.8 cm wavelength. *Astron. J.* **71**, 902-915 (1966).
  15. В.К.Головков. Определение элементов вращения Венеры и координат областей поверхности с повышенной отражательной способностью в радиодиапазоне. В сб.: *Физика Луны и планет*. М., Наука, 314-319 (1972).
  16. G.H.Pettengil, R.Dyce. A radar determination of the rotation of the planet Mercury. *Nature* **206**, 1240 (1965).
  17. H.C.Rumsey, G.A.Morris, R.R.Green, R.M.Goldstein. A radar brightness and altitude image of a portion of Venus. *Icarus* **23**, 1-7 (1974).
  18. O.N.Rzhiga. Venera 15 and 16 Spacecraft: Images and Maps of Venus. *Adv. Space Res.* 7, No 12, 269-278 (1987).
  19. Атлас поверхности Венеры. Редакционная коллегия: В.А.Котельников, В.Р.Яценко, Э.Л.Аким, А.Т.Базилевский, В.Л.Барсуков, А.Ф.Богомолов, Е.В.Громов, А.И.Калачнюк, А.В.Кравченко, В.М.Ковтуненко, Н.Л.Макаренко, О.Н.Ржига, А.С.Селиванов, А.И.Сидоренко, В.В.Точёнов, Ю.С.Тюфлин. М., ГУТК при СМ СССР, (1989) 328.
  20. R.S.Saunders, G.H.Pettengill. Magellan: Mission summary. *Science* **252**, 247-249 (1991).
  21. S.J.Ostro, R.F.Jurgens, D.K.Yeomans, E.M.Standish, W.Greiner. Radar detection of Phobos. *Science* **243**, 1584-1586 (1989).
  22. R.M.Goldstein, G.A.Morris. Ganymede: Observation by radar. *Science* **188**, 1211-1212 (1975).
  23. R.M.Goldstein, G.A.Morris. Radar observations of the rings of Saturn. *Icarus* **20**, 260-262 (1973).

24. D.O.Muhleman, A.Grossman, B.J.Butler, V.A.Slade. Radar reflectivity of Titan. *Science* **248**, 975-980 (1990).
25. S.J.Ostro, D.B.Campbell, G.H.Pettengill, I.I.Shapiro. Radar detection of Vesta. *Icarus* **43**, 169-171 (1980).
26. P.G.Kamoun, D.B.Campbell, S.J.Ostro, G.H.Pettengill, I.I.Shapiro. Comet Encke: Radar detection of nucleus. *Science* **216**, 293-295 (1982).
27. S. J.Ostro, R.S.Hudson, R.F.Jurgens, K.D.Rosema, R.Winkler, D.Howard, R.Rose, M.A.Slade, D.K.Yeomans, J.D.Giorgini, D.B.Campbell, P.Perillat, J.F.Chandler, I.I.Shapiro. Radar images of asteroid 4179 Toutatis. *Science* **270**, 80-84 (1995).
28. R.M.Goldstein, S.J. Goldstein. Flux of Millimetric Space Debris. *Astron. J.* **110**, 1392-1396 (1995).
29. О.Н.Ржига, А.Л.Зайцев. Возможности радиолокационного комплекса Центра Дальней космической связи под Евпаторией по исследованию загрязненности околоземного пространства. В сб.: *Околоземная астрономия*. М., Космоинформ, 118-127 (1998).
30. А.Л.Зайцев, А.Г.Сокольский, О.Н.Ржига, А.С.Вышлов, А.П.Кривцов, В.А.Шубин. Радиолокационные исследования астероида 4179 Таутатис на волне 6 см. *Радиотехника и электроника*, **38**, 1842-1850 (1993).
31. A.L.Zaitsev, S.J.Ostro, S.P.Ignatov, D.K.Yeomans, A.G.Petrenko, D.Choate, O.K.Margorin, R.A.Cormier, V.V.Mardyshkin, R.Winkler, O.N.Rzhiga, R.F.Jurgens, V.A.Shubin, J.D.Giorgini, A.P.Krivtsov, K.D.Rosema, Y.F.Koluka, M.A.Slade, A.L.Gavrik, V.B.Andreev, D.V.Ivanov, P.S.Peshin, Y.Koyama, M.Yoshikava, A.Nakamura. Intercontinental bistatic radar observations of 6489 Golevka (1991 JX). *Planetary Space Sci.* **45**, 771-778 (1997).
32. M.Di Martino, S.Montebugnoli, G.Cevolani, S.Ostro, A.Zaitsev, S.Righini, L.Saba, S.Poppi, M.Delbo, A.Orlati, G.Maccaferri, C.Bortolotti, A.Gavrik, Y.Gavrik. Results of the first Italian planetary radar experiment. *Planetary and Space Science* **52**, 325-330 (2004).
33. А. Л. Зайцев. Радиолокационные исследования астероидов, сближающихся с Землёй. Диссертация на соискание учёной степени доктора физико-математических наук. М. (1997) 75.
34. О.Н.Ржига. Развитие методики и некоторые результаты исследования физической природы планет при помощи радиолокации. Диссертация на соискание учёной степени доктора физико-математических наук. М. (1971) 252.
35. Л.В.Рыхлова. Исследования загрязнения околоземного пространства. В сб.: *Столкновения в околоземном пространстве (космический мусор)*. М., Космоинформ, 9-18 (1995).
36. Ю.Н.Александров, Б.И.Кузнецов, Г.М.Петров, О.Н.Ржига. Методика радиолокационных астрометрических наблюдений. *Астрономич. ж.* **49**, 175-185 (1972).