



Результаты радиолокационных наблюдений Венеры и Марса в 2012 году с помощью модернизированного планетного радиолокатора в Евпатории

Захаров А.И., Захарова Л.Н., Синило В.П., Сорочинский М.В.,
Степанова Т.С., ФИРЭ им. В.А.Котельникова РАН

Хрущев А.В., Ромашов Р.В., Рязанов И.С., Сунгуров А.Н., ОАО РКС

Степаньянц В.А., Воропаев В.А., Шишов В.А. ИПМ РАН

История радиолокационных наблюдений в СССР



Радиолокационные исследования планет в СССР были начаты в 1960 году по инициативе директора ИРЭ РАН академика В.А. Котельникова.

В отличие от косвенных оптических, радиолокационные методы дают прямые измерения расстояния на основе времени прохождения радиосигнала до планеты и обратно. Благодаря радиолокационным измерениям расстояния и скорости можно определять положение планет в пространстве с точностью на несколько порядков выше, чем на основе оптических наблюдений их углового положения.

История радиолокационных наблюдений в СССР



Накопление измерительного материала в 1961 - 1980 г. вместе с использованием зарубежного радиолокационного и оптического измерительного материала позволило создать единую релятивистскую теорию движения планет Земля, Венера, Марс и Меркурий. Прогноз взаимного положения планет в 50-100 раз точнее прогноза по классической теории движения планет.

Отклонения измеренных расстояний до планет от рассчитанных по единой теории их движения не превышали значений: для Венеры – 0.9 км за 1970-1980 гг.; для Марса – 2.5 км за 1967-1980 гг.; Меркурия – 2.0 км в 1980 г.

С начала 90х до настоящего времени измерения не проводились.

Планетный радиолокатор на базе антенны П2500 в Евпатории (80-е годы)



D=70 м
S=2500 кв.м.
λ=6 см
P=200 кВт
Tш=30 град

ЛЧМ сигнал
с предискажением
на излучении

Спектральный анализ
с накоплением
при приеме

Полоса регистрации:
Венера – 2 КГц
Марс – 32 КГц

Модернизация планетного радиолокатора в ОАО РКС

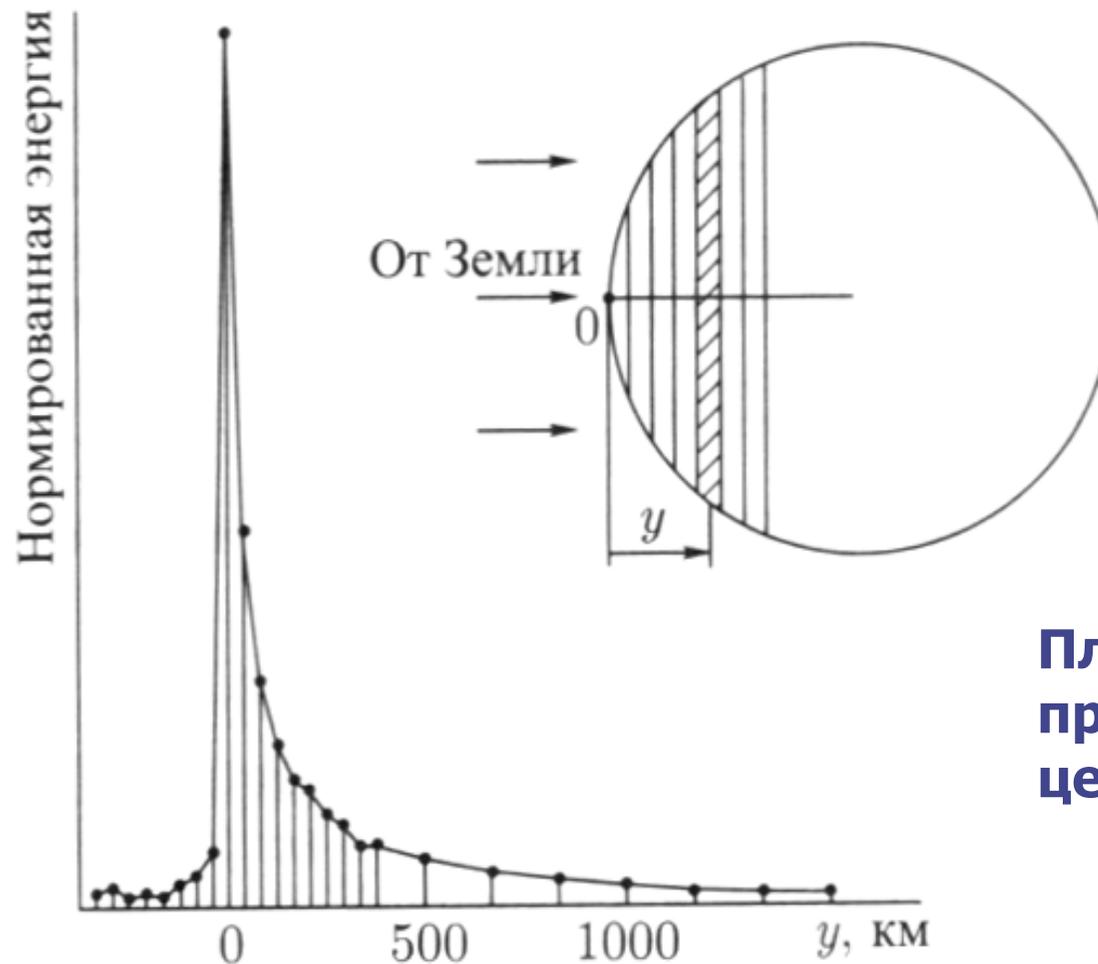


Нынешний вариант планетного радиолокатора (ПРЛ) более всего отличается от предшественника в части формирования, приема и обработки сигналов.

Формирование, прием и обработка сигналов реализованы на базе современных технических решений.

Создана мощная система с возможностью изменения параметров зондирующего сигнала в широком диапазоне значений, предобработку принятого сигнала и регистрацию потока данных с темпом до 10 Мбит/с.

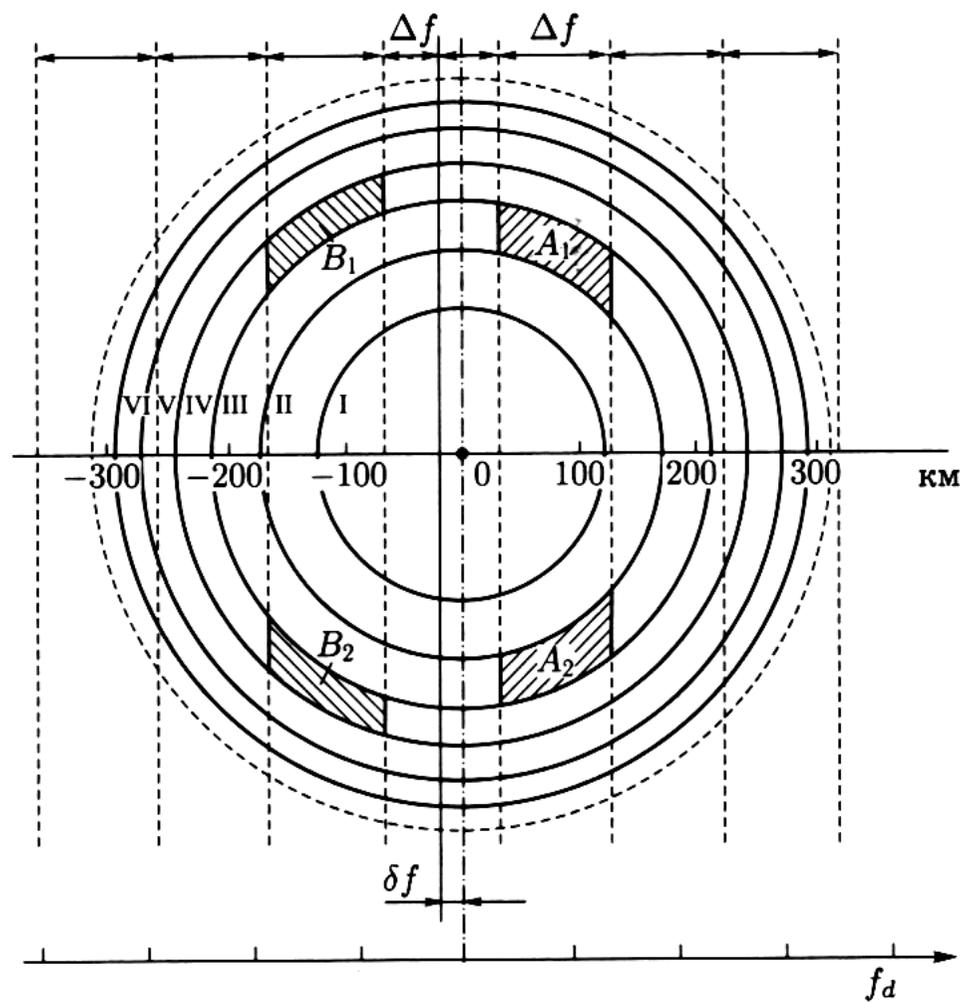
Геометрия радиолокационной съемки. Распределение отраженного сигнала по дальности.



**Планета –
протяженная
цель!**

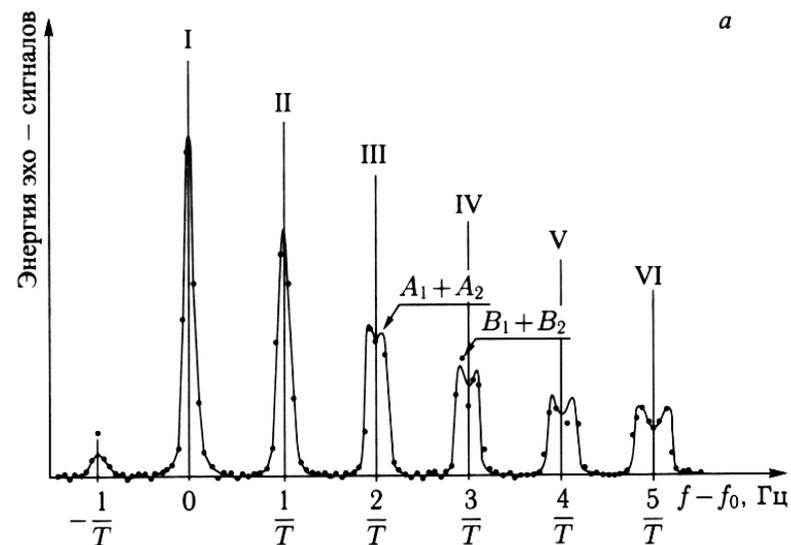
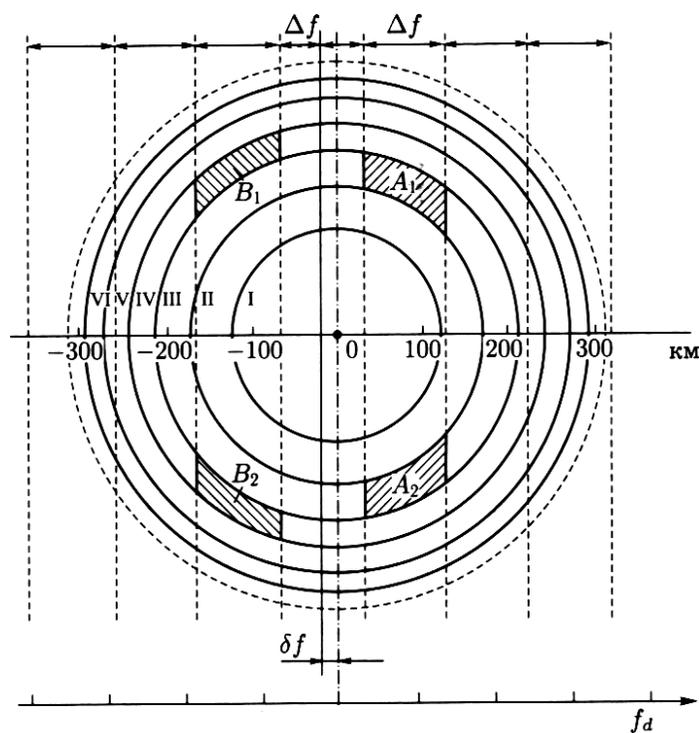


Отражение в координатах «дальность-доплер»





Вид распределения отражений при обработке с помощью ЛЧМ гетеродинирования





Энергетические показатели при планетной радиолокации Марса

Расчет предельной дальности при планетной радиолокации

При расчете использовались следующие параметры планетного радиолокатора:

Площадь антенны 2500 м^2

Длина волны 6 см

Полоса частот отраженного сигнала 870 Гц

Шумовая температура приемника 30 К

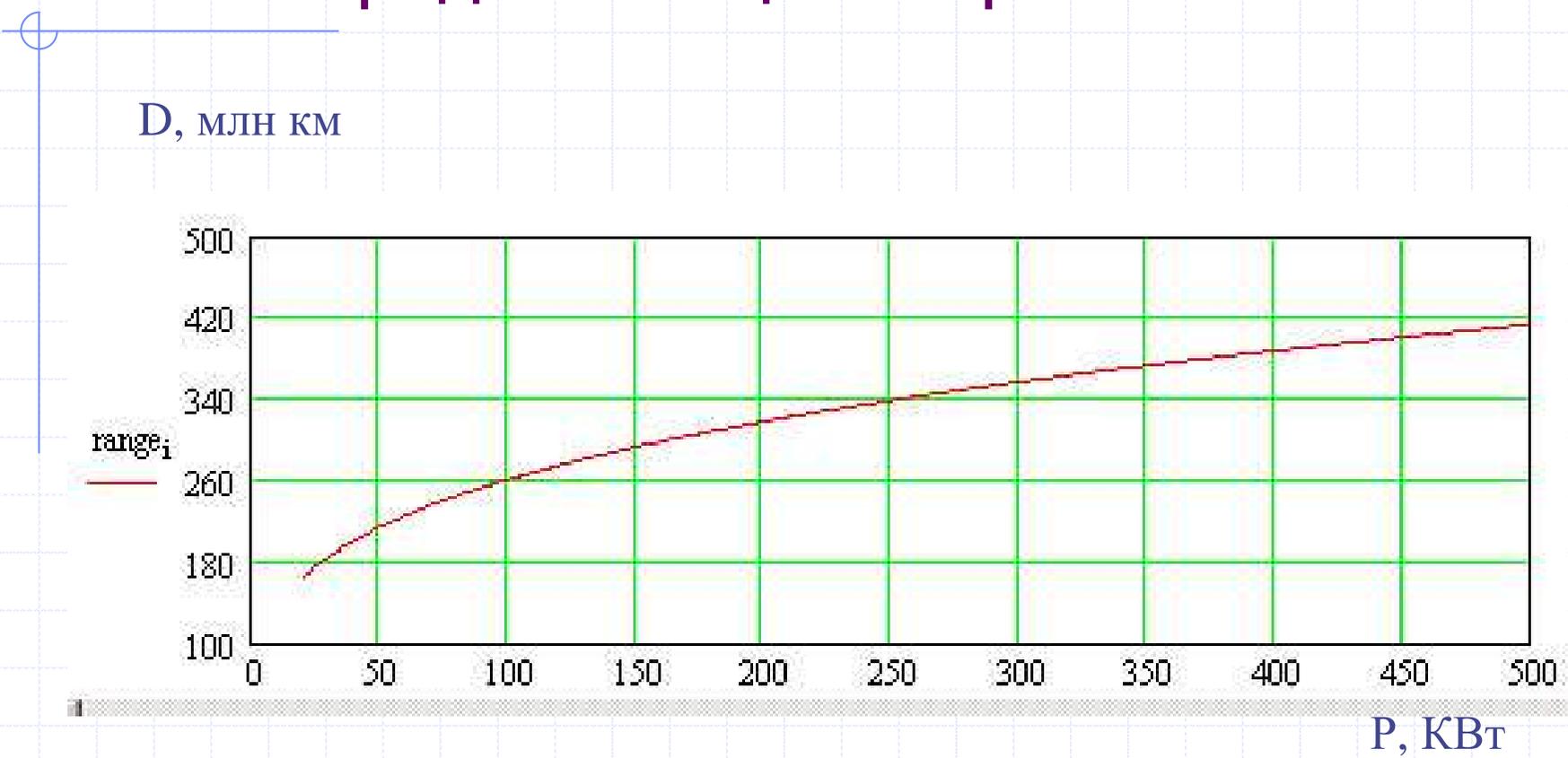
Разрешение по дальности 5 км

ЭПР Марса $5.8 \cdot 10^{11} \text{ м}^2$

Сигнал/шум на выходе системы обработки = 5 (при максимально возможном некогерентном накоплении сигнала на приеме).



Предельная дальность при наземной радиолокации Марса



Вариации дальности до Марса





Энергетические показатели при планетной радиолокации Венеры

Расчет предельной дальности при планетной радиолокации Венеры

При расчете использовались следующие параметры планетного радиолокатора:

Площадь антенны 2500 м^2

Длина волны 6 см

Полоса частот отраженного сигнала 5 Гц

Шумовая температура приемника 30 К

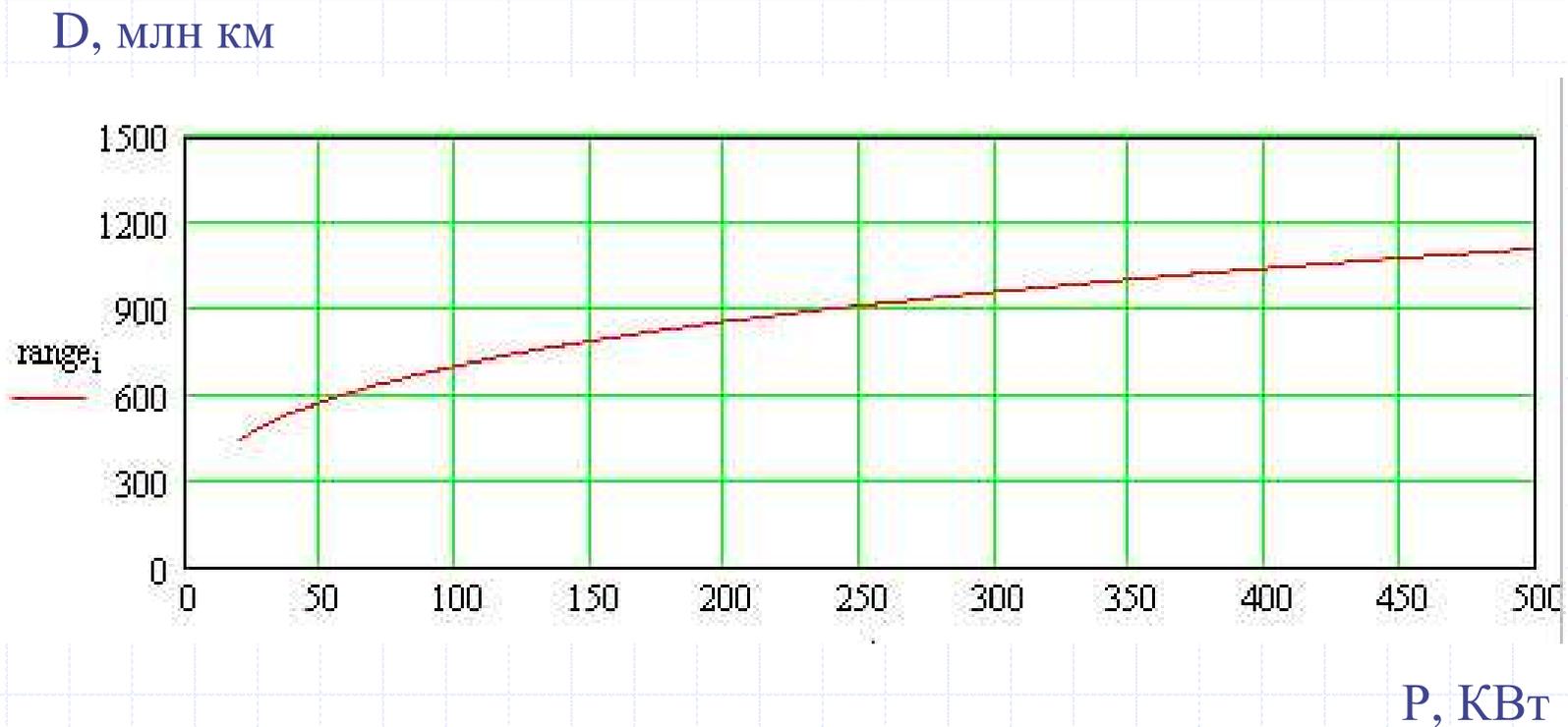
Разрешение по дальности 5 км

ЭПР Венеры $1.4 \cdot 10^{12} \text{ м}^2$

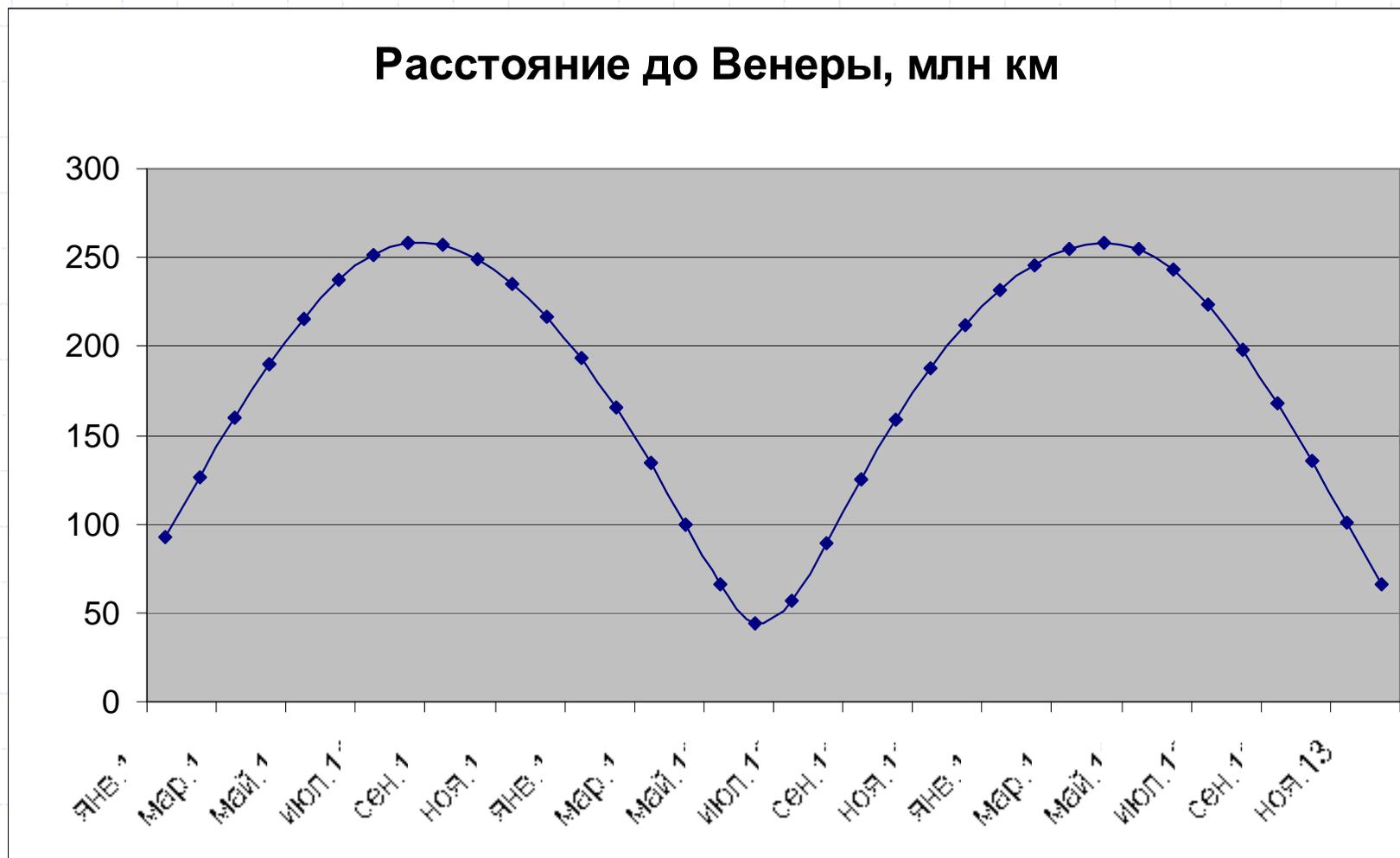
Сигнал/шум на выходе системы обработки = 5 (при максимально возможном некогерентном накоплении сигнала на приеме).



Предельная дальность D при наземной радиолокации Венеры, млн км



Вариации дальности до Венеры

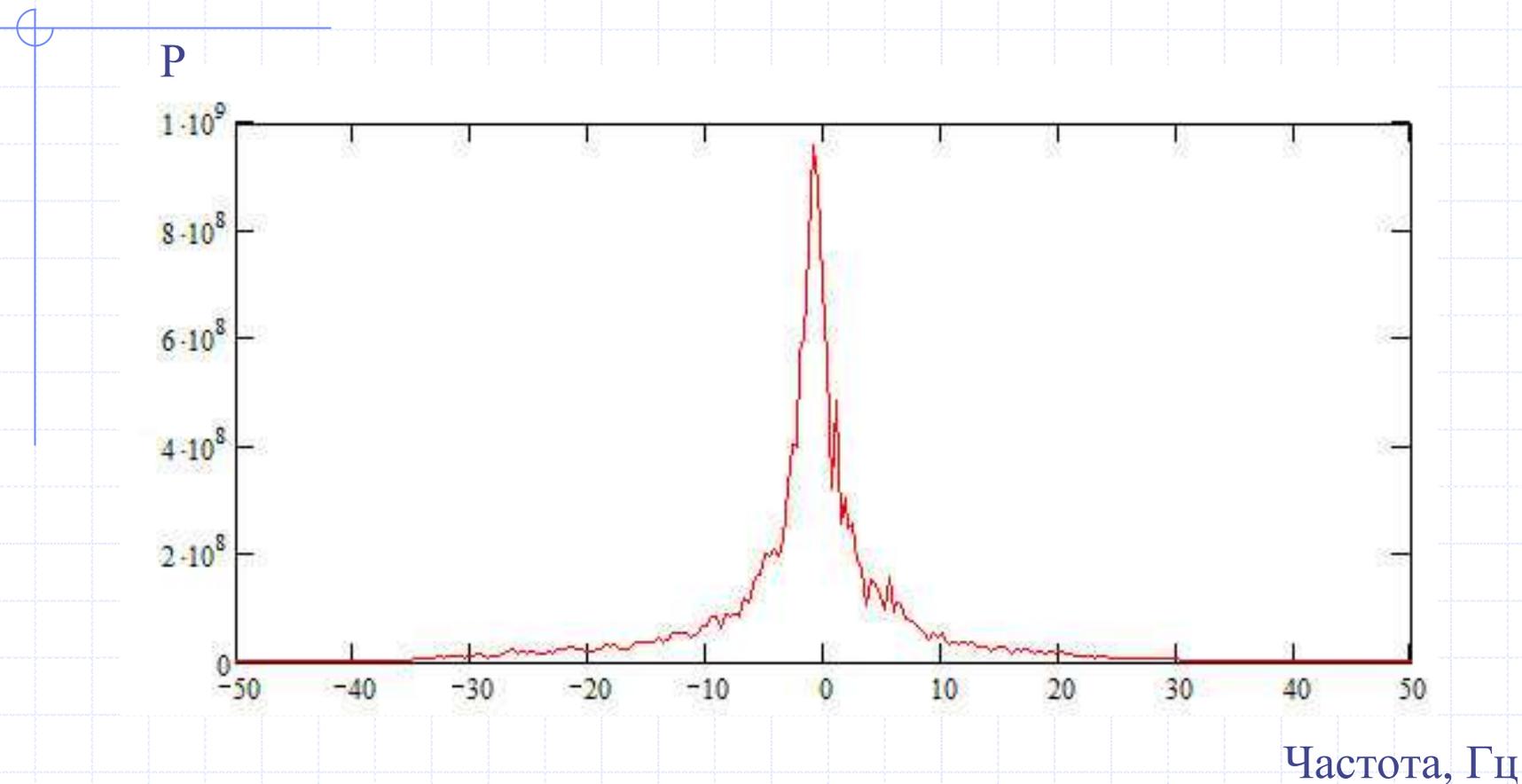


Наземная радиолокация Венеры в 2012 году.



В июньских сеансах радиолокации Венеры применялись несущая и ЛЧМ сигнал. Отношение сигнал-шум, оцененное по сеансам с несущей, составляет ~ 30 дБ, что близко к теоретическим оценкам для этой планеты на расстоянии 44 млн км с параметром шероховатости Хэгфорса 400, отражательной способностью поверхности 0.05 при мощности передатчика ПРЛ 100 КВт и шумовой температуре приемной системы 30° .

Наземная радиолокация Венеры в июне 2012 г. Спектр несущей.



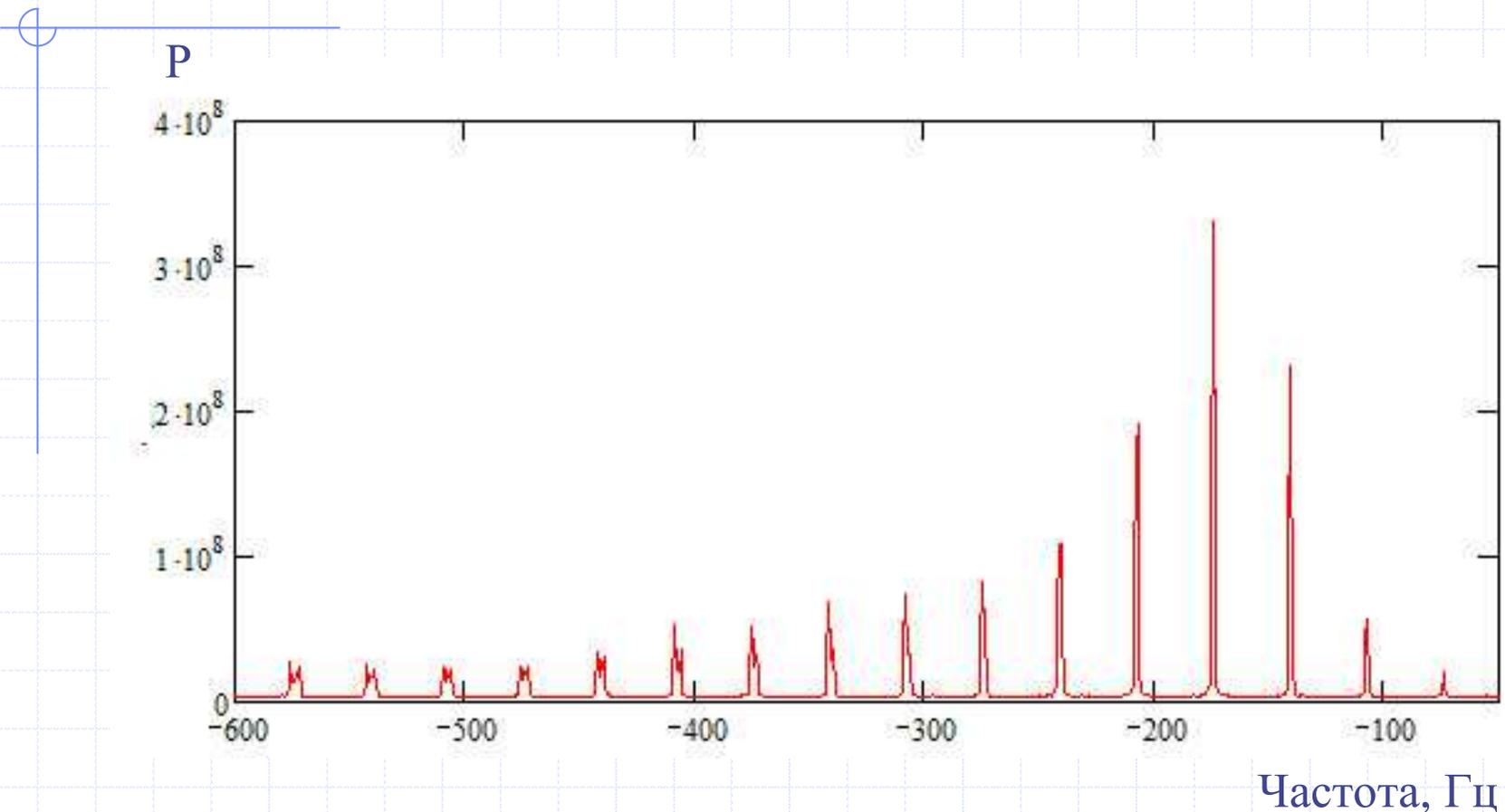
Разрешение по частоте 0.3Гц. Видимый период вращения планеты 405дней

Наземная радиолокация Венеры в 2012 году.



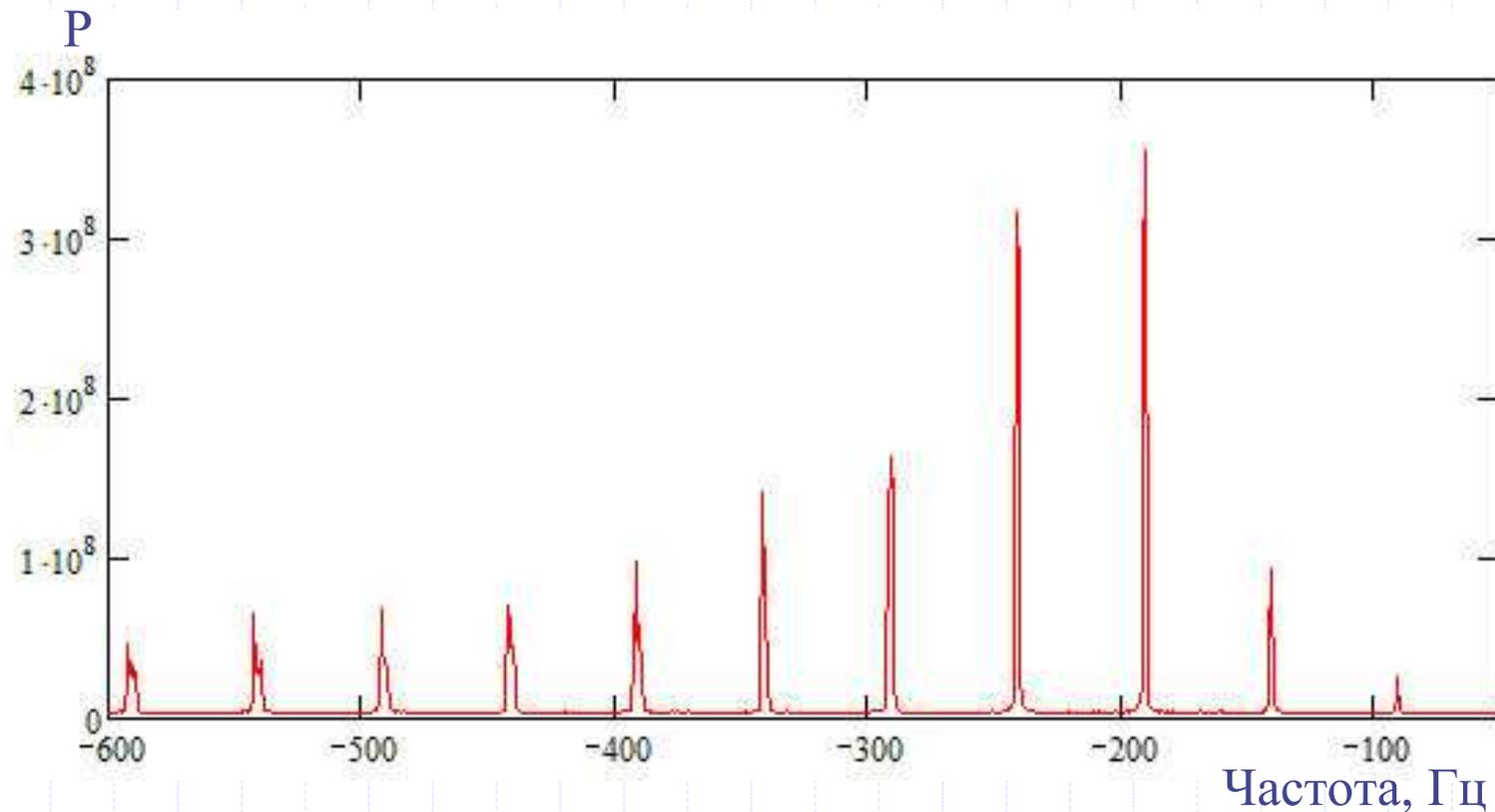
Измерения дальности до Венеры проводились в сеансах с ЛЧМ сигналом с девиацией 100, 200, 400, 500 КГц и периодом повторения 20 и 30 мс. Измеренные поправки к дальности до Венеры, прогнозированной ИПМ РАН, показывают, что эта планета в июне находилась на 3.8 км дальше прогноза.

Наземная радиолокация Венеры в июне 2012 г. с использованием ЛЧМ сигнала



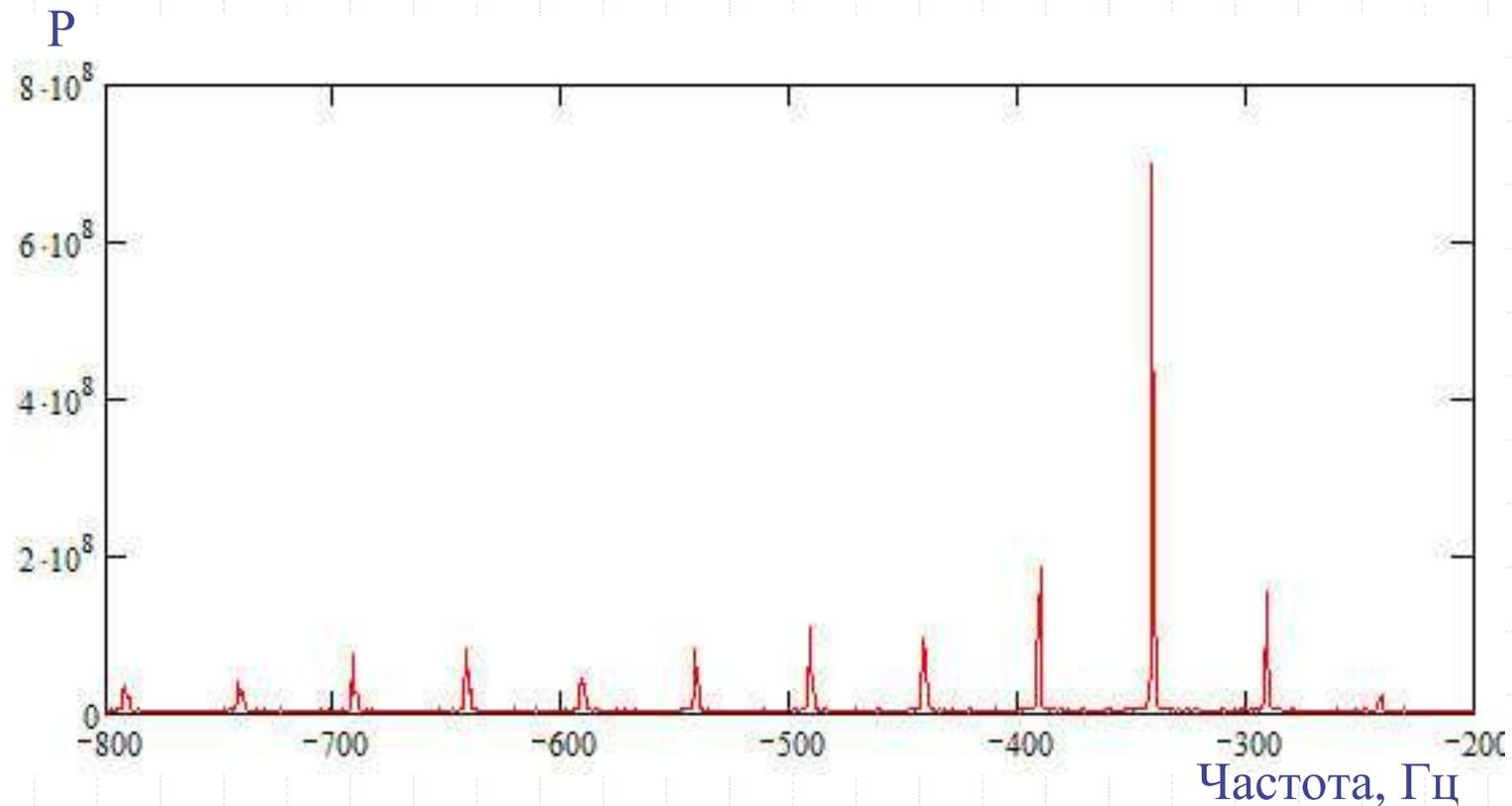
Спектр отраженного Венерой ЛЧМ сигнала после ЛЧМ-гетеродинирования. Девиация частоты 195 КГц, период 30 мс.

Наземная радиолокация Венеры в июне 2012 г. с использованием ЛЧМ сигнала



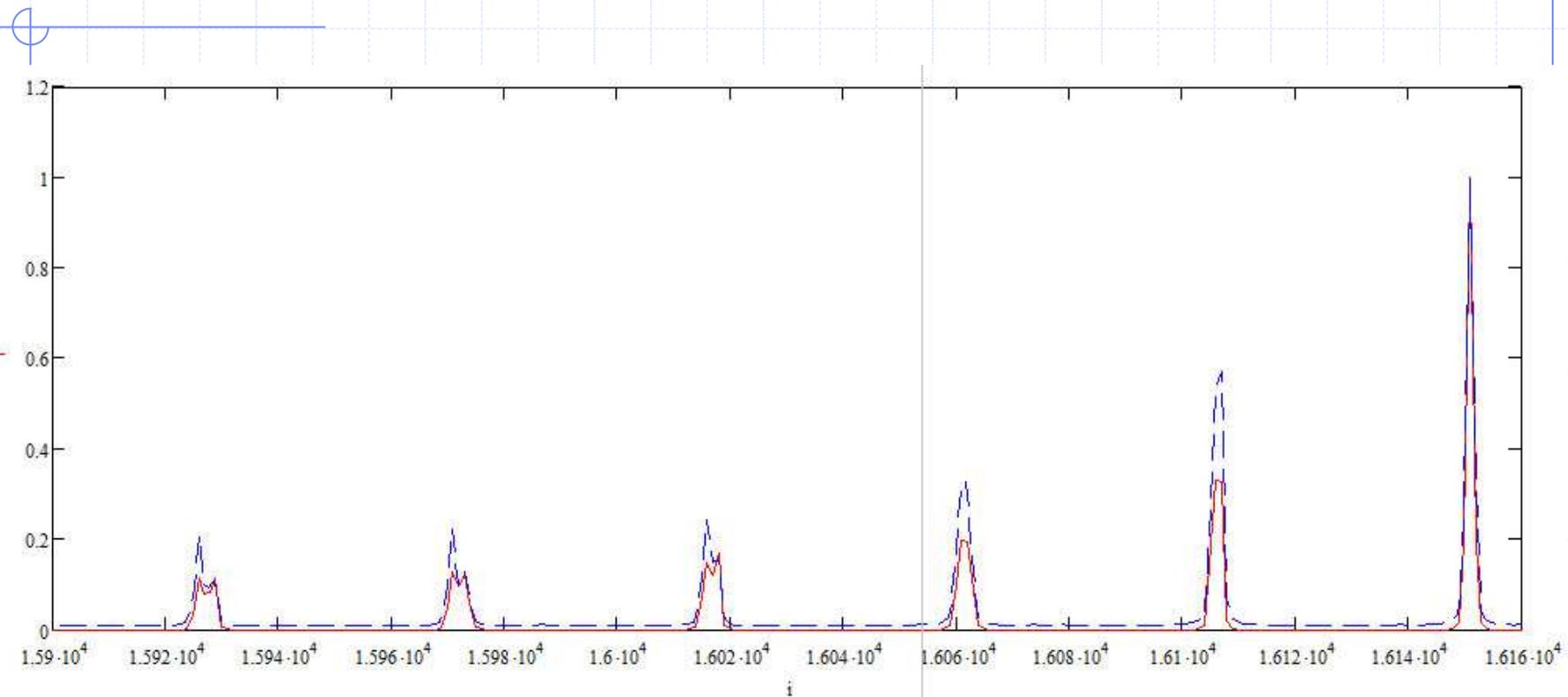
Спектр отраженного Венерой ЛЧМ сигнала после ЛЧМ – гетеродинирования. Девиация частоты 195 КГц, период 20 мс.

Наземная радиолокация Венеры в июне 2012 г. с использованием ЛЧМ сигнала



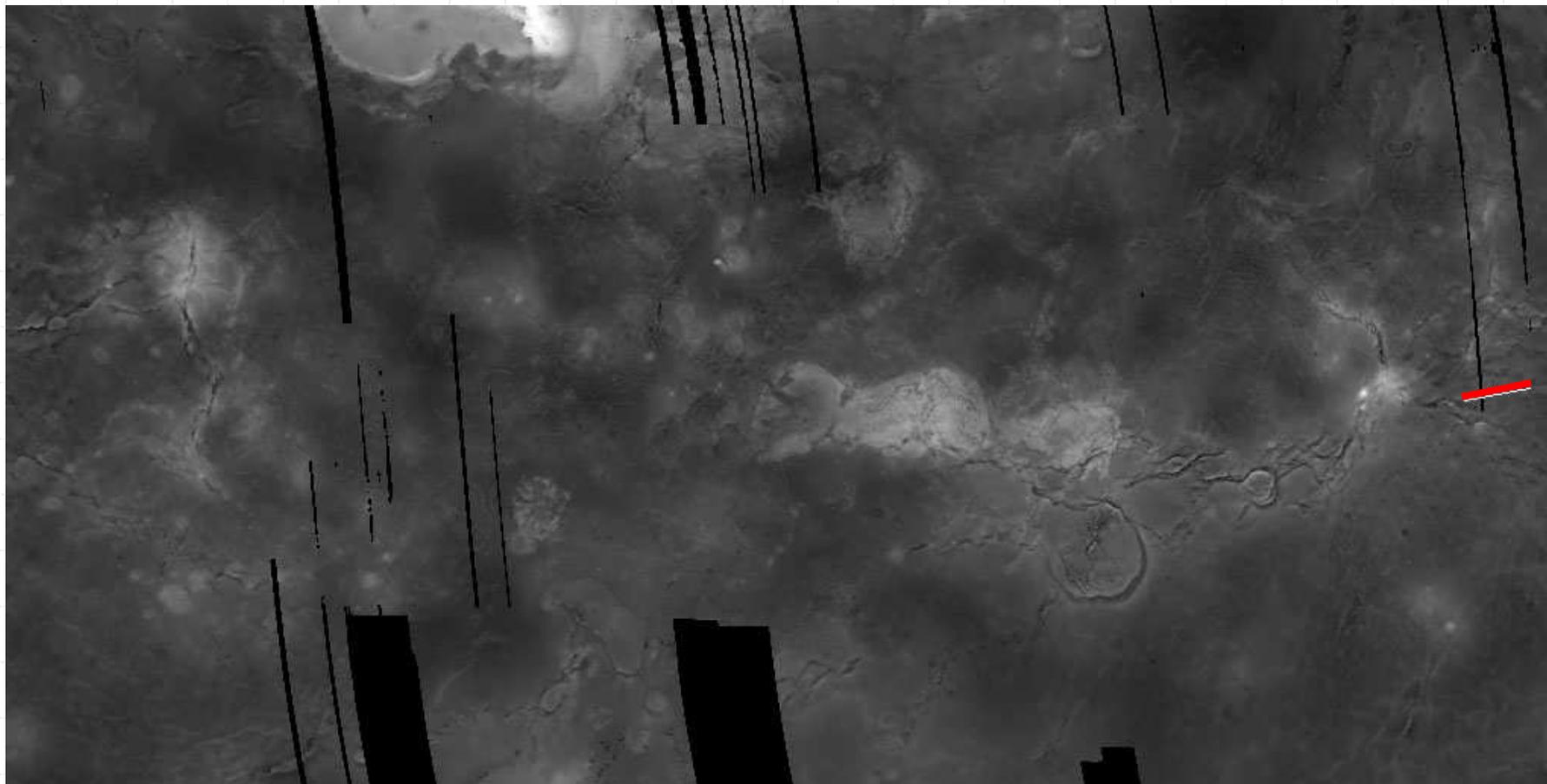
Спектр отраженного Венерой ЛЧМ сигнала после ЛЧМ – гетеродинирования. Девияция частоты 390 КГц, период 20 мс.

Наземная радиолокация Венеры в июне 2012 г. с использованием ЛЧМ сигнала



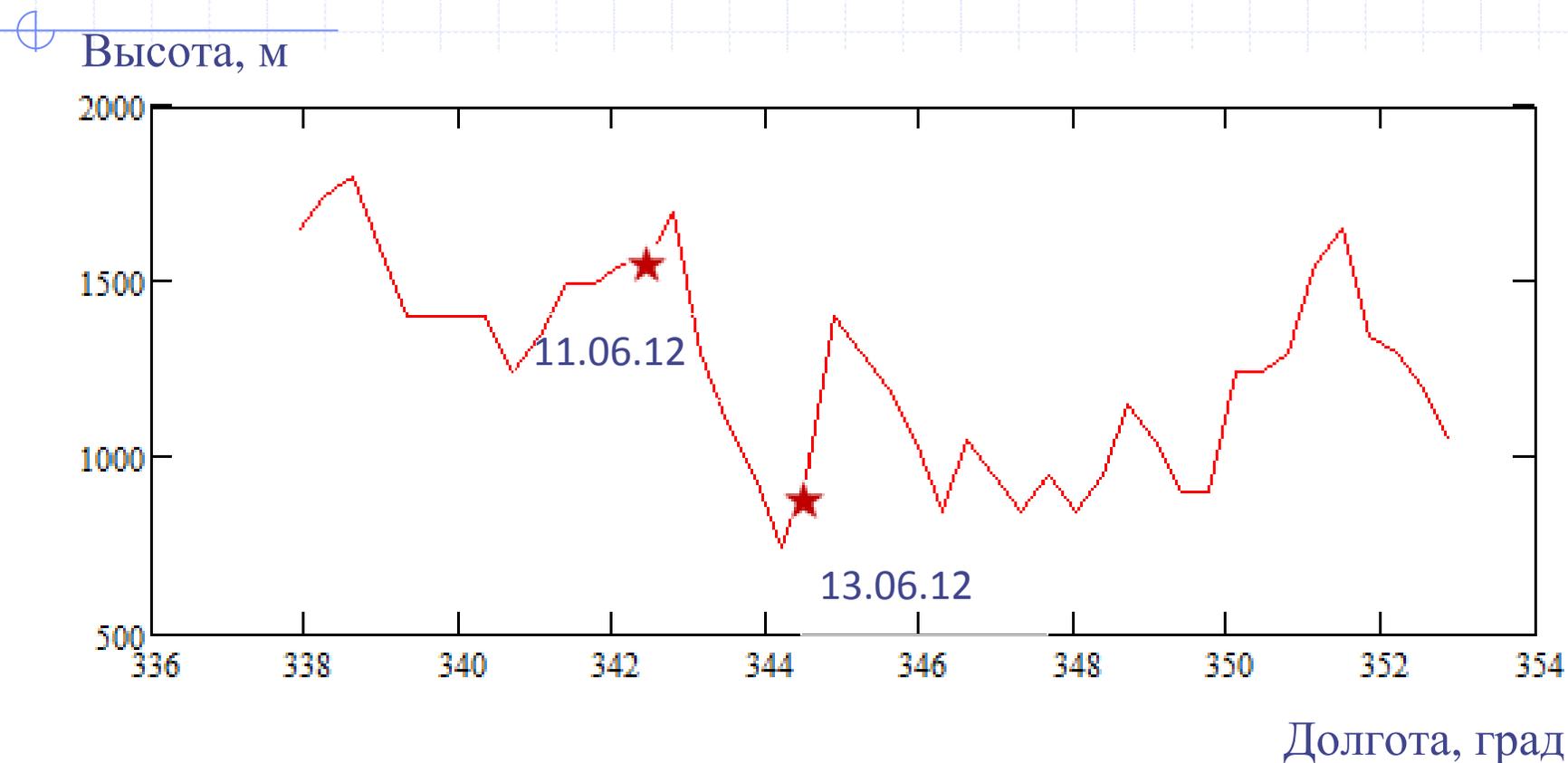
Совмещение спектра отраженного Венерой ЛЧМ сигнала после ЛЧМ-гетеродинирования с теоретической моделью при измерении задержки.

Наземная радиолокация Венеры в 2012 году.



Трасса подлокаторной точки на поверхности Венеры 11-18 июня 2012 г, совмещенная с картой высот планеты по данным миссии «Магеллан»

Наземная радиолокация Венеры в 2012 году.



Профиль высот по трассе по данным миссии «Магеллан».

Звездочками отмечено положение подлокаторной точки 11 и 13 июня 2012 г.

Измерения поправок к дальности до Венеры 11 июня 2012 года.



N	Время UTC, с	Девияция, <u>КГц</u>	Период, <u>мсек</u>	Задержка, сек (прогноз)	Измеренная поправка по Г, км	<u>Разреше-</u> <u>ние по Г, км</u>
3	29106.370	195	30	292.500387	3.84	0.77
4	30314.717	195	30	292.522667	3.84	0.77
5	31518.385	195	20	292.545530	3.84	0.77
6	32735.669	195	20	292.568726	3.84	0.77
7	33936.727	390	20	292.591888	3.84	0.38
8	35140.337	390	20	292.615372	3.84	0.38
11	42466.444	390	20	292.763995	3.84	0.38
12	43612.685	390	20	292.788064	3.84	0.38
13	44736.582	390	20	292.811853	3.84	0.38
14	45938.169	390	20	292.837482	3.84	0.38
15	47143.437	390	20	292.863376	сигнала	

Измерения поправок к дальности до Венеры 13 июня 2012 года.



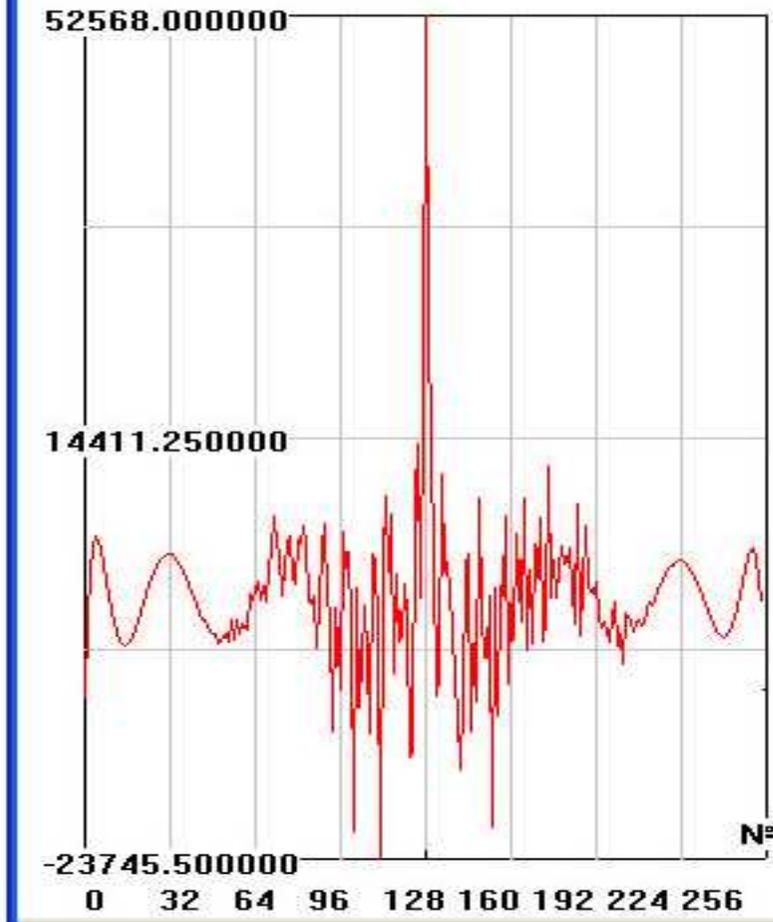
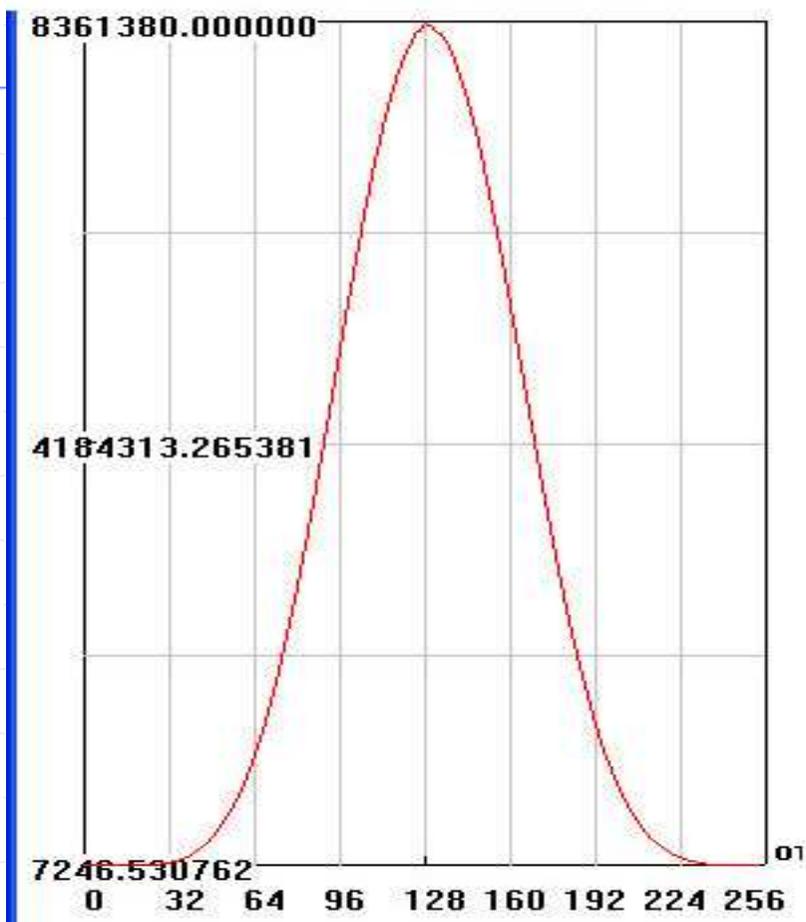
<u>N</u>	<u>Время UTC, с</u>	<u>Девiation, КГц</u>	<u>Период, мсек</u>	<u>Задержка, сек (прогноз)</u>	<u>Измеренная поправка по г, км</u>	<u>Разрешение по г, км</u>
3	38135.869	195	20	296.624533	4.6	0.77
4	39343.463	390	20	296.657283	0.0	0.38
5	40546.059	390	20	296.690143	0.0	0.38
6	41737.796	390	20	296.722939	-20.4	0.38
7	42938.989	390	20	296.756219	3.84	0.38
8	44151.041	390	20	296.790130	4.2	0.38
9	45339.976	390	20	296.823358	4.2	0.38
10	46543.674	390	20	296.857299	4.2	0.38

Наземная радиолокация Марса в 2012 году.



В сеансах радиолокации Марса также применялись несущая и ЛЧМ сигнал с девиацией 32 КГц и периодом повторения 1 КГц. Из-за большой дальности да Марса в июне 2012 г (больше 180 млн км) сигнал с отношением сигнал-шум ~ 10 , близким к теоретическому, был обнаружен только в одном сеансе с несущей на излучении.

Наземная радиолокация Марса. Сигнал – несущая. Длительность сеанса 15 мин.



На рисунках - спектр сигнала в полосе 195 КГц. Ширина фильтра ~ 0.8 КГц. Некогерентное накопление > 0.5 млн. Номинальная частота – в фильтре № 128. Слева – спектр сигнала в смеси с шумом. Справа – сигнал после вычитания шума, аппроксимированного полиномом 12-й степени.



Заключение

Результаты работ 2012 года показали готовность аппаратуры ПРЛ и наземного математического обеспечения обработки сигналов к регулярным работам по планетной радиолокации.



Предложения по использованию Евпаторийского ПРЛ

- Радиолокация планет земной группы и спутников Юпитера,
- Радиолокация астероидов, пролетающих вблизи Земли на расстояниях до 1 млн. км (бистатическая схема),
- Радиолокация космического мусора на околоземных орбитах (бистатическая схема),
- Радиозондирование солнечного ветра сигналами межпланетных станций,
- Исследование ионосфер и атмосфер планет радиозатменным методом.