

Определение местоположения космического аппарата Chandrayaan-3 на Луне по доплеровским измерениям сигнала наземным приемным комплексом

Казанцева Е.О., Бондаренко Ю.С., Маршалов Д.А. и Медведев Ю.Д.
Институт прикладной астрономии РАН, Санкт-Петербург, Россия



ВВЕДЕНИЕ

Для определения местоположения космического аппарата (КА) в пространстве применяются оптические и радиотехнические методы. Наземные оптические наблюдения КА имеют низкую точность, поскольку подвержены влиянию атмосферы, а результатом измерений является направление на объект, а не расстояние до него. Кроме того, такие наблюдения ограничены погодными условиями и временем суток. Измерить непосредственно расстояние до КА позволяют методы лазерной и радиолокации. Оба метода имеют высокую точность (порядка сантиметров), однако требуют наличие на борту КА угловых отражателей, либо транспондера. Стандартными радиотехническими методами определения положения КА, излучающего радиосигнал в направлении Земли, являются доплеровские и радиоинтерферометрические измерения, которые дают скорость КА по лучу зрения, и направление на него, соответственно.

В связи с увеличением числа космических программ, направленных на исследование и освоение Луны, возникает необходимость в оперативном определении координат посадочных модулей (ПМ) на ее поверхности с приемлемой точностью. Современные численные эфемериды Луны позволяют определить местоположение ПМ, используя только доплеровские измерения. В работе была поставлена задача оценки точности метода определения положения ПМ по доплеровским измерениям сигнала на примере индийского КА «Чандраян-3».

НАБЛЮДЕНИЯ СИГНАЛА И ОПРЕДЕЛЕНИЕ МЕСТОПОЛОЖЕНИЯ ПОСАДОЧНОГО МОДУЛЯ «ЧАНДРАЯН-3»

Миссия «Чандраян-3» была запущена индийской организацией космических исследований с целью изучения реголита и проведения сейсмологических исследований в южной полярной области Луны. После успешной посадки 23 августа 2023 года в течение 14 земных суток ПМ «Чандраян-3» передавал на Землю научную информацию и сигналы телеметрии на частотах S и X диапазонов – 2268 и 8460 МГц пока не вышел из строя 4 сентября. Наблюдения сигнала ПМ «Чандраян-3» проводились 28 августа и с 1 по 4 сентября 2023 года с использованием 13.2-метровых радиотелескопов обсерваторий «Зеленчукская» и «Светлое», входящих в состав РСДБ-комплекса «Квазар-КВО». Сигнал регистрировался в S и X диапазонах частот в правой и левой круговых поляризациях. Измерения значений несущих частот 2268 и 8460 МГц принятых сигналов проводились с помощью цифровой петли с фазовой автоподстройкой частоты. Анализ доплеровских измерений показал уменьшение отношения сигнал - шум и деградацию сигнала.

Для определения местоположения излучателя ПМ на поверхности Луны по численной эфемериде DE440 была построена модель изменения частоты сигнала, принятого соответствующей антенной на Земле. В качестве исходных данных были использованы доплеровские измерения, полученные 28 августа и 1 сентября, однако, применение стандартного метода наименьших квадратов не позволило определить селенографические долготу и широту ПМ из-за высоких значений среднеквадратического отклонения (СКО) частоты сигнала.

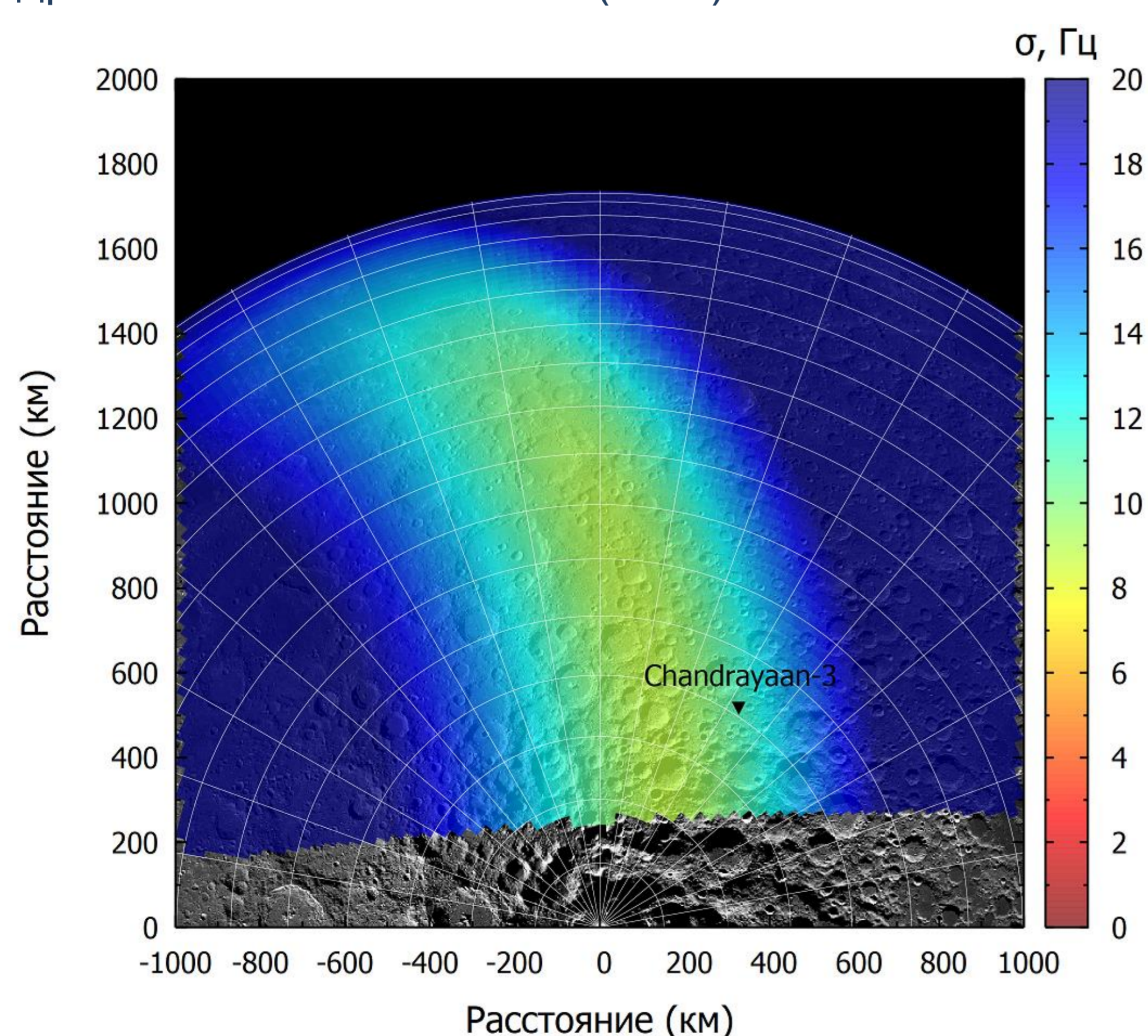


Рис. 1 Карта поверхности Луны с наложенными на нее значениями СКО доплеровских измерений сигнала в зависимости от местоположения передатчика по наблюдениям 28.08.23 и 01.09.2023 на частоте 8460 МГц, в ортографической проекции.

Поэтому был использован метод вариации координат, не зависящий от точности используемых измерений. Полученные данным методом значения СКО частоты сигнала в герцах для соответствующих координат были нанесены на карту Луны с шагом в 1 градус по широте и долготе. Наименьшие значения СКО составляют порядка 8 Гц и определяют вероятную область расположения ПМ размерами примерно 200x1000 км, при этом ПМ «Чандраян-3» (черный треугольник) находится практически на границе полученной области. Таким образом, точность полученных доплеровских измерений сигнала ПМ «Чандраян-3» не позволила однозначно определить его местоположение на поверхности Луны.

ВЛИЯНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК ДОПЛЕРОВСКИХ ИЗМЕРЕНИЙ НА ОПРЕДЕЛЕНИЕ МЕСТОПОЛОЖЕНИЯ ИЗЛУЧАТЕЛЯ НА ПОВЕРХНОСТИ ЛУНЫ

Основное влияние на точность определения местоположения излучателя на поверхности Луны оказывают ошибка частоты излучения сигнала, длительность измерений, а также относительное расположение излучателя и приемных станций. С помощью построенной модели были сгенерированы ряды доплеровских измерений длительностью 20 минут на частоте 8460 МГц для обсерватории «Зеленчукская». При этом погрешность модельных измерений варьировалась в пределах 10^{-1} – 10^{-6} Гц. Ориентируясь на текущий уровень техники, следует рассматривать погрешность бортовых часов в диапазоне значений 10^{-5} – 10^{-3} Гц. Тогда ошибка в определении координат ПМ будет находиться в пределах от 100 м до 10 км для 20 минутного интервала измерений.

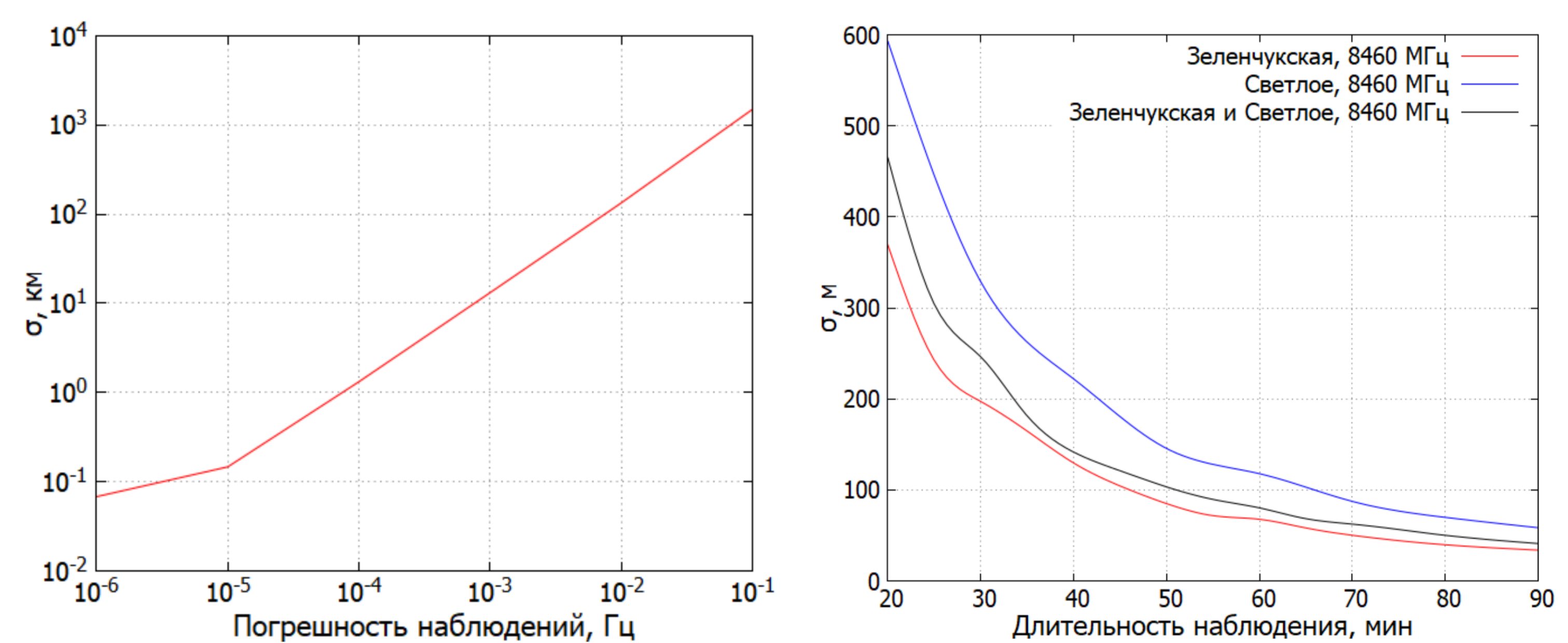


Рис. 2 Зависимости СКО определения местоположения ПМ от погрешности измерений и от длительности измерений и выбранной конфигурации излучателя и приемных станций.

Для оценки влияния длительности измерений и их конфигурации время сеанса модельных наблюдений варьировалось от 20 до 90 минут на частоте 8460 МГц для обсерваторий «Зеленчукская» и «Светлое», при погрешности доплеровских измерений порядка 10^{-4} Гц. Наименьшее СКО местоположения ПМ в 34 м достигается при использовании обсерватории «Зеленчукская» на 90-минутном интервале наблюдений.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате работы построена модель, позволяющая по наземным доплеровским измерениям сигнала излучателя на поверхности Луны определить его местоположение. Для данной модели наблюдений определены основные зависимости ошибки определения положения ПМ от точности и длительности наблюдений, конфигурации наземного приемного комплекса. Для источника сигнала с относительной нестабильностью частоты порядка 10^{-13} , работающего в X диапазоне частот при длительности сеанса наблюдений 90 минут СКО ошибки определения его координат на поверхности Луны составит около 34 м. По доплеровским измерениям сигнала «Чандраян-3» была определена область вероятного расположения ПМ размерами порядка 200x1000 км. Такой результат обусловлен нестабильностью сигнала передатчика, которая повышалась от 10^{-11} до 10^{-8} на интервале наблюдений. В ближайшее десятилетие США и КНР планируют развертывание сети маяков на поверхности Луны. Использование в маяках часов с относительной нестабильностью частоты сигнала на уровне 10^{-12} – 10^{-13} позволит построить и поддерживать налунную систему координат с метровой точностью. Реализованный нами метод применим как к отдельным аппаратам, так и к сети радиомаяков.