

## РЕКОМЕНДАЦИЯ МСЭ-R RA.1750-0\*

**Взаимное планирование для спутниковой службы исследования Земли (активной) и радиоастрономической службы в полосах частот 94 ГГц и 130 ГГц**

(2006)

**Сфера применения**

В данной Рекомендации определены меры, которые должны быть предприняты в спутниковой службе исследования Земли (ССИЗ) (активной) и в радиоастрономической службе (РАС) для минимизации возможного влияния радаров картографирования облачности ССИЗ (активной) в полосах частот 94 ГГц и 130 ГГц при наблюдениях РАС в смежных полосах частот.

Ассамблея радиосвязи МСЭ,

*учитывая,*

- а) что ожидается, что текущие и будущие эксперименты с использованием бортового спутникового радара картографирования облачности ССИЗ (активной) в полосах частот 94 и 130 ГГц, общих с РАС, дадут важные научные результаты в области глобального климата;
- б) что РАС, вероятно, будет продолжать исследования важных научных вопросов в полосах частот 94 ГГц и 130 ГГц, общих с ССИЗ (активной);
- с) что для миллиметровых длин волн коэффициент усиления, имеющийся у направленной антенны как на спутнике, так и на наземных станциях РАС, очень высок, что создает возможность очень устойчивой связи главный лепесток – главный лепесток между передающей антенной спутника и антенной РАС;
- д) что для получения требуемых отраженных радиолокационных сигналов от атмосферных явлений, орбитальные радары ССИЗ (активной) требуют очень высокой э.и.и.м., что может привести к физическому повреждению чувствительных приемников РАС в случае связи главный лепесток-луч;
- е) что оборудование отдельной РАС может состоять из десятков или даже сотен излучающих в одном направлении антенн, некоторые из которых или все могут быть одномоментно совместно расположены в пределах главного лепестка спутника ССИЗ (активного), увеличивая многократно результаты случайного наложения главный лепесток-главный лепесток;
- ф) что для миллиметровых длин волн современная технология не позволяет реализовать высокоэффективные полосно-заграждающие фильтры с достаточно низкими вносимыми потерями в требуемой полосе пропускания;
- г) что в приемниках, используемых в РАС для миллиметровых длин волн, должна быть использована современная технология, чтобы они были достаточно чувствительными для проведения точных астрономических исследований, и что такой технологией в настоящее время допускается очень ограниченный динамический диапазон с достаточно низким порогом насыщения;
- б) что из-за высокой ожидаемой э.и.и.м. радара облачности, связь главный лепесток-боковой лепесток между передатчиком спутника и станцией РАС может вызвать насыщение приемника РАС, потенциально препятствуя наблюдениям на станции РАС для значительной доли времени пребывания спутника с активным радаром облачности над местным горизонтом;
- ж) что современная технология позволяет снабжать станции РАС приемными системами на базе многоэлементной фокальной матричной плоскости, имеющими такую полную чувствительность

---

\* В 2017 году 7-я Исследовательская комиссия по радиосвязи внесла редакционные поправки в настоящую Рекомендацию в соответствии с Резолюцией МСЭ-R 1.

главного лепестка, которая образует угловую область, в 1000 раз большую по сравнению с точечным приемником,

*далее учитывая,*

- a) что, по необходимости, обсерватории РАС с миллиметровыми волнами работают на частотах, совместно используемых с ССИЗ (активной), только при сухих ясных условиях, так что атмосферное ослабление не защищает станцию РАС от спутникового радара;
- b) что необходимо взаимное планирование между операторами ССИЗ (активной) и радиоастрономами для предотвращения повреждения оборудования РАС и для поддержки достоверности данных как РАС, так и ССИЗ (активной) в максимально возможной степени;
- c) что Координационная группа по космическим частотам (SFCG) и Научный комитет по распределению частот для радиоастрономии и исследования космоса (IUCAF) разработали процедуру<sup>1</sup> взаимного планирования организациями – членами SFCG и радиоастрономическими обсерваториями для бортовых космических радаров облачности, предназначенных для работы в полосе частот 94–94,1 ГГц,

*рекомендует,*

- 1 чтобы на как можно более ранней стадии цикла проектирования системы радара облачности ССИЗ (активной) был установлен контакт между разработчиками и операторами ССИЗ (активной) и местами расположения радиообсерваторий – международная организация IUCAF может обеспечить начальный контакт между операторами ССИЗ и потенциально затрагиваемыми радиоастрономическими обсерваториями;
- 2 чтобы тесный контакт между радиоастрономами и операторами системы ССИЗ (активной) поддерживался на протяжении проектирования и эксплуатационного ресурса всех систем, которые будут совместно использовать полосы частот 94 ГГц и 130 ГГц, так чтобы каждая сторона информировалась об имеющихся отношении к делу усовершенствованиях у другой стороны;
- 3 чтобы проектирование и работа систем, функционирующих в каждой службе, осуществлялись так, чтобы принимать во внимание, насколько это возможно, совместное использование;
- 4 чтобы соображения, относящиеся к совместному использованию, данные в Приложении 1, должны приниматься в расчет при проектировании и функционировании таких систем;
- 5 чтобы пример, представленный в Приложении 2, влияния на оборудование, работающее в радиоастрономической службе, со стороны спутника, функционирующего в ССИЗ (активной), принимался в расчет при проектировании и работе станций обеих служб.

## Приложение 1

### **Соображения, относящиеся к проектированию и работе систем, предназначенных для совместного использования ССИЗ (активной) и РАС в полосах частот 94 ГГц и 130 ГГц**

**Для ССИЗ (активной):**

- Активная радарная система должна проектироваться в соответствии с наилучшей инженерной практикой для минимизации нежелательных излучений и для минимизации внеосевых излучений от радарной антенны на боковые лепестки.

---

<sup>1</sup> См. Резолюцию 24-2 SFCG на: [https://www.sfcgonline.org/resolutions/RES\\_SFCG\\_24-2\\_\(94\\_GHz\\_allocation\\_use\).pdf](https://www.sfcgonline.org/resolutions/RES_SFCG_24-2_(94_GHz_allocation_use).pdf).

- Насколько практически возможно, система ССИЗ (активная) должна быть спроектирована и управляться таким образом, чтобы избежать передачи через ее главный лепесток непосредственно на станциях РАС.
- Операторы системы ССИЗ (активной) должны обеспечить, чтобы вся возможная оперативная помощь предоставлялась станциям РАС, например предоставление своевременной орбитальной информации от спутникового радара.

#### Для РАС:

- Станции РАС должны проектироваться так, чтобы обеспечить возможность предотвращения прямого наведения их антенн на орбитальный радар за счет гибкого динамического программирования наблюдений или других средств.
- На станциях РАС должны быть предусмотрены средства для защиты их приемников от физического повреждения, если невозможно полностью избежать случайного наложения главных лепестков.
- В разумных пределах, без ухудшения характеристик станции РАС, приемные системы РАС должны проектироваться так, чтобы они имели высокую устойчивость к повреждениям от передач с высоким уровнем мощности и чтобы они имели настолько большой динамический диапазон, насколько это возможно.
- Антенны РАС должны проектироваться с наименьшим практически достижимым уровнем боковых лепестков, с тем чтобы наблюдения можно было бы продолжать, пока спутниковый радар находится над местным горизонтом, хотя и не направляет свой радар на станцию РАС.
- Системы сбора данных РАС должны быть спроектированы так, чтобы, основываясь на известных эксплуатационных параметрах РАС и спутника, регистрировать или отмечать возможные случайные помехи от орбитального радара.
- В РАС должно продолжаться выделение ресурсов на расширение возможностей технических средств по снижению радиопомех (RFI) в режиме реального времени или после наблюдений.

## Приложение 2

**Пример соображений, относящихся к совместному использованию, которые должны приниматься во внимание при проектировании и работе систем РАС и ССИЗ (активной) в полосе частот 94 ГГц**

### **CloudSat и результаты для Атакамской большой антенной решетки миллиметрового диапазона волн (ALMA)**

#### **Аннотация**

Атакамская обсерватория, оборудованная большой антенной решеткой миллиметрового диапазона волн (ALMA), находится в северном Чили в стадии строительства и станет основной обсерваторией с миллиметровыми и субмиллиметровыми длинами волн в мире. CloudSat – спутниковый бортовой радар с нижним обзором в полосе 94 ГГц должен быть запущен в 2005 году. Пиковое значение э.и.и.м. луча радара около  $4 \times 10^9$  Вт, что достаточно для повреждения приемников ALMA на земле, если антенны ALMA и орбитальный радар будут в какой-то момент направлены прямо друг на друга. Хотя вероятность того, что это случится, очень мала, в ALMA должны предприниматься некоторые практические меры предосторожности во избежание повреждения приемника и для обозначения данных, которые могут быть искажены помехами радара.

### Радиоастрономические возможности ALMA

ALMA – международный телескоп с миллиметровыми и субмиллиметровыми длинами волн, является результатом равноправного сотрудничества между Европой, Северной Америкой и Японией совместно с Республикой Чили.

Важные моменты относительно ALMA, которые стоит отметить:

- До 64 12-метровых антенн, расположенных на высоте 5000 метров в Llano de Chajnantor, Чили.
- Оборудование по созданию изображений во всех окнах прозрачности атмосферы между 10 мм и 350 микрон (от 31,3 ГГц до 950 ГГц).
- Конфигурации антенной решетки приблизительно от 150 м до 10 км.
- Пространственное разрешение в 10 угловых миллисекунд в 10 раз лучше, чем у космического телескопа Хаббл.
- Возможность отображать источники с размерами от угловых минут до градусов с разрешением в 1 угловую секунду.
- Разрешение по скорости до 0,05 км/с.
- Быстрое и гибкое оборудование по созданию изображений.
- Наибольшее и наиболее чувствительное оборудование в мире для миллиметровых и субмиллиметровых длин волн.

### Задача радара карты облаков

CloudSat – первый бортовой радар для использования диапазона 94 ГГц. Это часть группировки "A-train", состоящей из пяти спутников, большинство из которых (в отличие от CloudSat) пассивные спутники обнаружения. Эти спутники, в порядке расположения на орбите, Aqua, Cloud Mapping Radar, Calipso, Parosol и Aura. Parosol, Aqua и Aura уже на орбите, CloudSat на настоящий момент должен быть запущен в 2005 году. Все спутники будут иметь схожие орбиты, расположенные особым образом, для создания идентичных земных траекторий, разделенные лишь несколькими секундами во времени. Детали научной задачи следующие:

CloudSat – экспериментальный спутник, разработанный для измерения вертикальной структуры облаков из космоса. После запуска CloudSat будет вращаться в образовании как часть группировки спутников (A-Train), включающей спутники NASA Aqua и Aura, спутник – лазерный радар NASA-CNES (CALIPSO) и спутник CNES, несущий поляриметр (PARASOL). Уникальная функция, которую CloudSat привносит в эту группировку, способность двигаться по точной орбите, позволяющей перекрываться секторам обзора радара CloudSat с зоной охвата лазерного радара CALIPSO и другими измерениями группировки. Точность и почти одновременность этого перекрытия создает уникальную многоспутниковую систему наблюдений для изучения атмосферных процессов, важных с точки зрения гидрологических циклов.

Свойства вертикальных профилей облака, предоставляемые CloudSat в глобальном масштабе, заполняют важный пробел в исследовании механизма обратной связи, связывающей облака с климатом. Измерение этих профилей требует сочетания активных и пассивных инструментов, и это будет достигнуто путем объединения данных радара CloudSat с данными от других активных и пассивных сенсоров группировки.

### Технические подробности CloudSat

Радар CloudSat работает на частоте 94,05 ГГц на гелиосинхронной полярной орбите высотой 705 км; земная траектория орбиты (см. ниже) точно повторяется каждые 16 дней. Пиковая мощность передатчика радара 1800 Вт снижается до 1500 Вт к концу его срока службы, с антенной с коэффициентом усиления 63 дБи это дает примерно  $4 \times 10^9$  Вт эффективно излучаемой мощности (э.и.и.м.). Поляризация линейная. Радар направлен в сторону геодезического надира с точностью до 0,07 градуса. Номинальная зона охвата луча радара на земле ~1,4 км в диаметре, но расстояние от

зоны охвата до первых нулей диаграммы 3 км. Наведение известно с точностью  $0,053^\circ$ , а управление наведением около 1 км. ALMA с диаметром 14 км образует дугу в  $1,14$  градуса, если смотреть со спутника. Реальная земная траектория может иметь боковую ошибку  $\pm 10$  км, вызванную непредсказуемым компонентом атмосферного воздействия, отклоняющего орбиту. Длительность импульса радара приблизительно 3,3 мкс, а частота следования импульсов (PRF) варьируется от 3700 до 4300 Гц, давая среднюю мощность передатчика радара около 25 Вт.

Антенна CloudSat – параболическая, со смещенным облучателем, ширина луча составляет  $0,108^\circ$ , коэффициент усиления вдоль оси 63 дБи. Расстояние до первого нуля диаграммы  $\pm 0,125^\circ$ . Первый боковой лепесток,  $0,2$  градуса от оси, имеет коэффициент усиления в 47 дБи. Коэффициент усиления антенны составляет 0 дБи для примерно  $\pm 6,4^\circ$ , а за пределами примерно  $\pm 11^\circ$  характеристика антенны не превышает примерно  $-12$  дБи.

Так как луч радара всегда направлен вниз, вдоль местного вектора действия силы тяжести, единственная возможность для антенн ALMA оказаться направленными непосредственно на луч радара, если они направлены непосредственно на зенит, а радар пролетает прямо над местом их расположения. Это маловероятное событие. Луч CloudSat будет иногда направлен в сторону от надир для калибровки, но это измерение будет всегда осуществляться над океаном, так что не должно стать проблемой для ALMA.

### Орбита CloudSat

Так как луч радара направлен в надир, то непосредственно облучается только земная поверхность под спутником, точка под спутником. Орбитальный период 98,8 минуты, что составляет  $\sim 15$  оборотов в день, а наклон орбиты  $98,2^\circ$ ; это гелиосинхронная орбита, расположенная таким образом, что земные траектории точно повторяются каждые 16 дней. Для ALMA это будет 5 или 6 орбит в день, которые восходят над горизонтом. После 16-дневного периода, это будет 233 орбиты, что даст земные траектории, покрывающие Землю регулярно каждые 170 км (на экваторе), с таким же, конечно, количеством восходящих и нисходящих проходов.

CloudSat будет иметь орбиту, похожую на первый спутник A-Train, AQUA, который уже на орбите. В дальнейшем обсуждении использованы орбитальные параметры AQUA как представляющие будущий CloudSat. Эти параметры AQUA, вероятно, останутся характерными, но могут не соответствовать точной орбите CloudSat.

Орбитальные параметры для AQUA (26 июля 2004 г.), используемые при представленном ниже моделировании:

1 27424U 02022A 04207.86676596 .00000493 00000-0 11941-3 0 7961

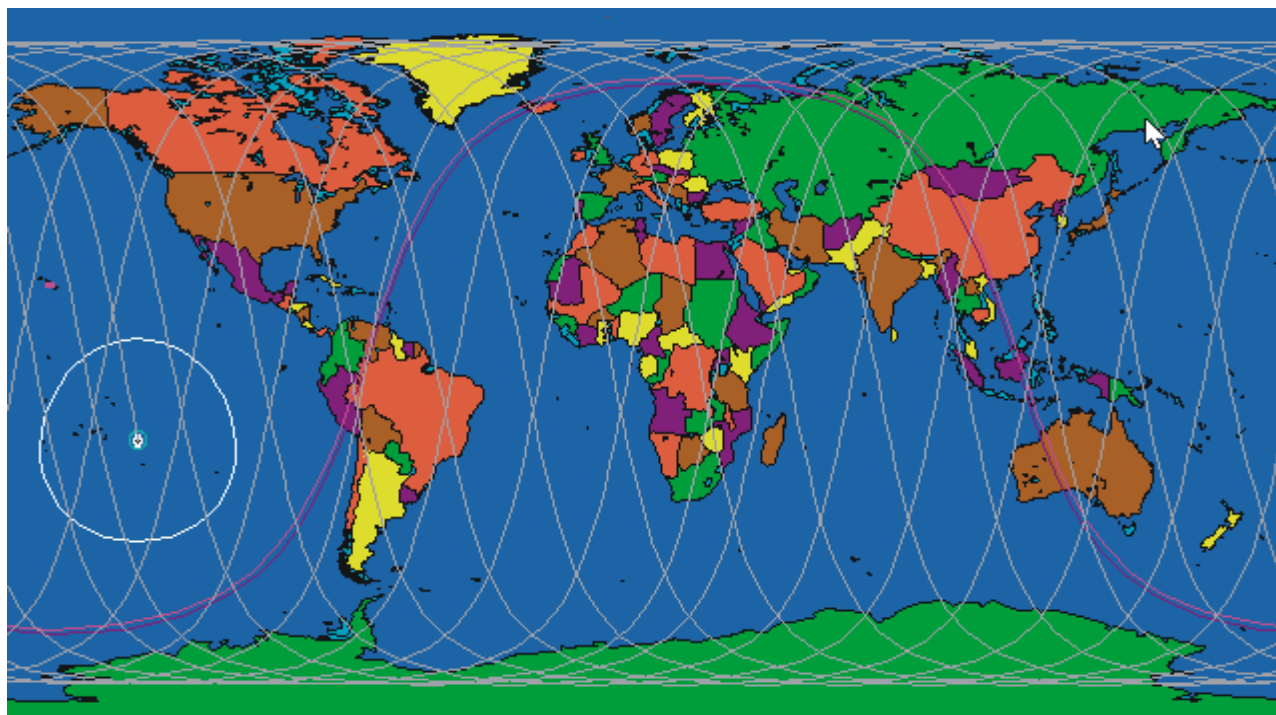
2 27424 98.2212 147.2739 0001153 89.3378 270.7995 14.57121862118484

Большинство стандартных программ по отслеживанию спутников предполагают этот формат. На основе этого орбитальный период AQUA в настоящее время 98,83 минуты и наклон орбиты  $98,221^\circ$ . Высота над землей примерно 705 км.

Далее приведенный орбитальный анализ использовал несколько различных программ. На рисунке 1 показана карта мира с земными траекториями Aqua, изображенными после 24 часов движения по орбите. Следует отметить, что из-за наклона орбиты ( $98,2^\circ$ ) не формируется траекторий за широтами  $\pm 81,8^\circ$ . Показаны как восходящие, так и нисходящие орбитальные траектории.

РИСУНОК 1

Траектория Aqua за 24 часа



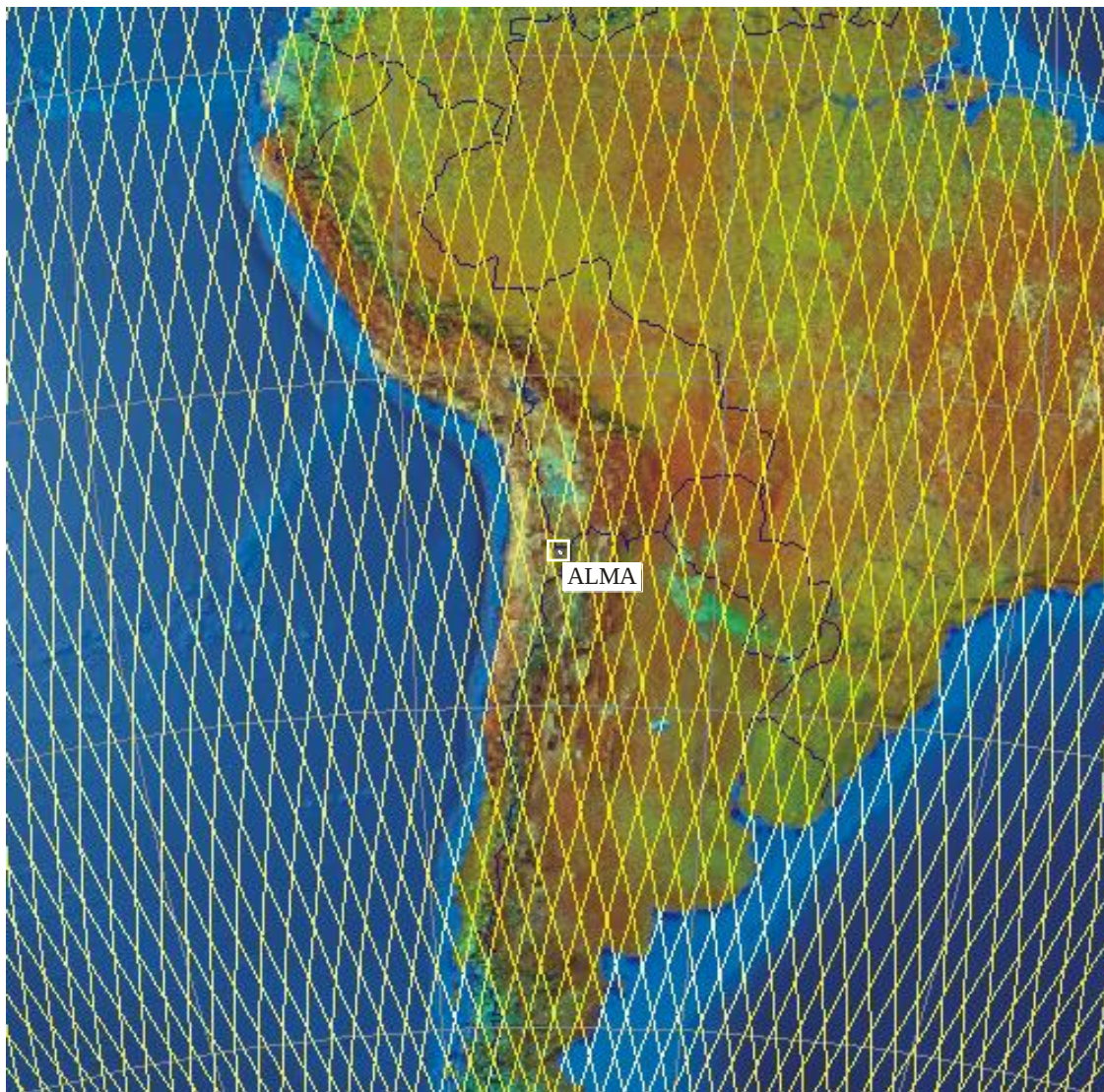
1750-01

Следует отметить, что светлой окружностью отмечен типичный размер земного горизонта, видимого с Aqua.

На рисунке 2 показан вид Южной Америки с отмеченными координатами ALMA и показан весь ряд земных траекторий за 16 дней. Для данных орбитальных параметров они представляют ВСЕ земные траектории со спутника; траектории точно повторяются каждые 16 дней. Как на рисунках 1 и 3, восходящие (Ю-С) орбиты направлены снизу справа налево вверх, тогда как нисходящие (С-Ю) орбиты направлены сверху справа налево вниз.

РИСУНОК 2

Земные траектории Aqua за полный 16-дневный период на карте Южной Америки  
с обозначенным положением ALMA



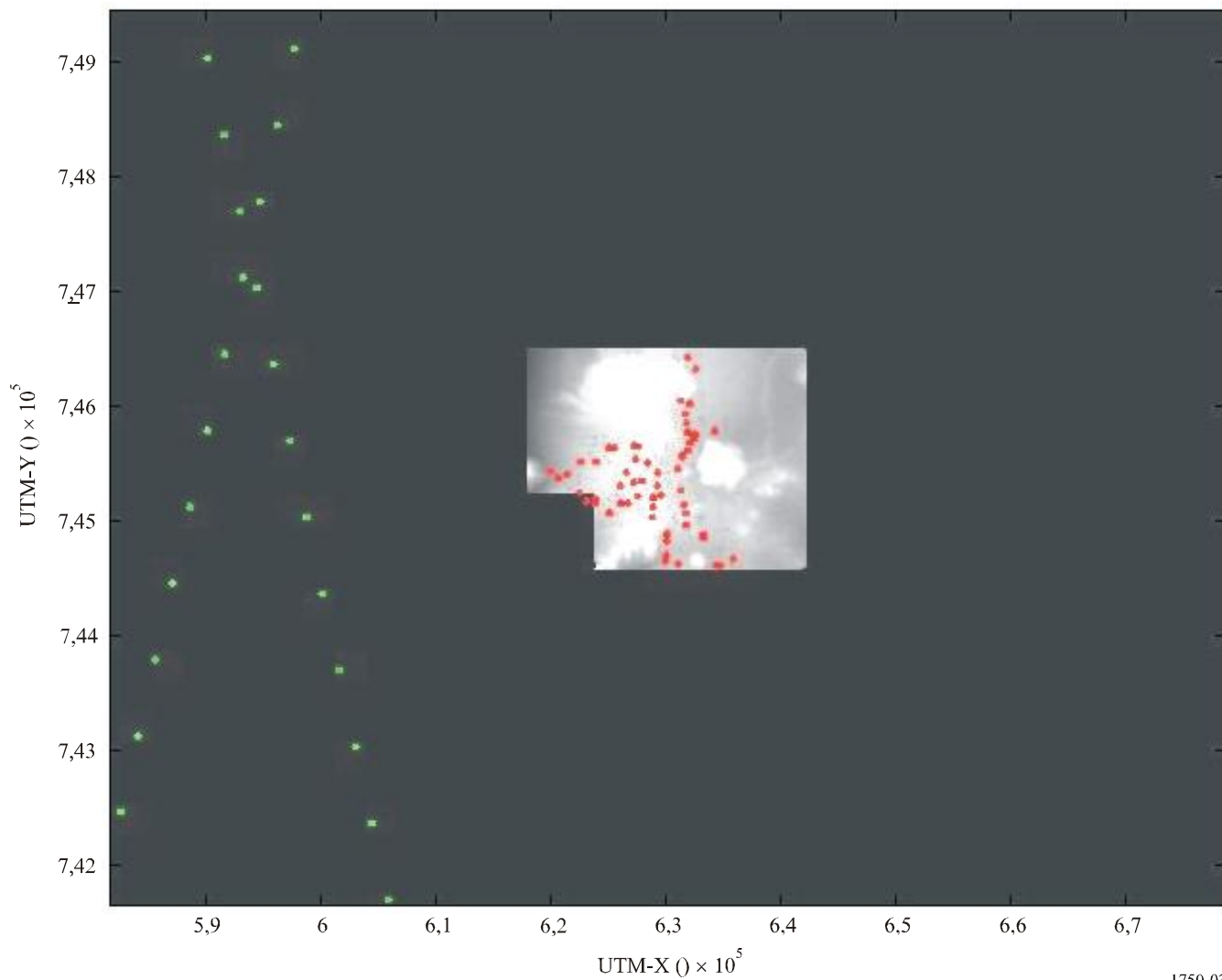
1750-02

Последующие траектории точно повторяются каждые 16 дней. Окончательные земные траектории CloudSat будут похожими, но не идентичными.

На рисунке 3 изображены более детально земные траектории, проходящие близко к ALMA за любой 16-дневный период.

РИСУНОК 3

**Земные траектории Aqua: зеленые точки слева обозначают наибольшее приближение земных траекторий Aqua к антенной решетке ALMA; эти точки разделены 1 секундой по времени вдоль орбиты Aqua, хотя передача радаром ведется, конечно, непрерывно**



1750-03

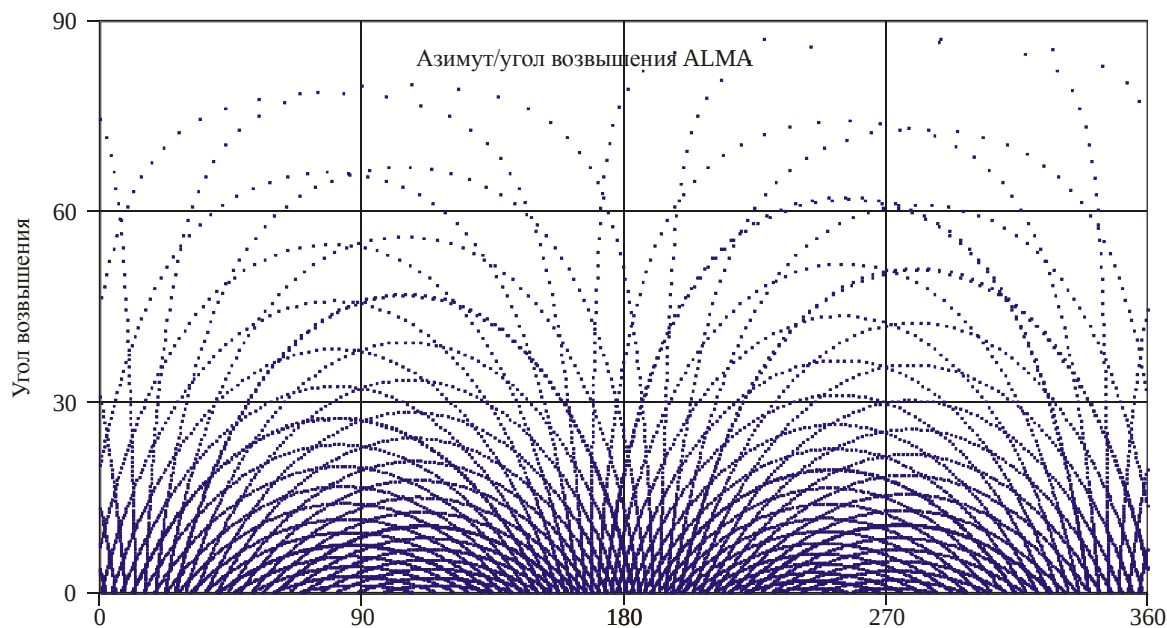
Центральные красные точки обозначают расположение антенны в расширенной конфигурации ALMA. Пометки у черточек на осях показывают координаты UTM с черточками каждые 10 км. Земная траектория Aqua приближается к центру ALMA в пределах ~30 км. Из показанных двух траекторий одна восходящая (Ю-С), а другая нисходящая (С-Ю). Эти 2 траектории разделены по времени примерно 8 днями, но обе повторяются каждые 16 дней.

Эти орбитальные траектории должны рассматриваться как характерные; земная траектория для конечной орбиты CloudSat может пройти ближе или дальше от ALMA.

На рисунке 4 изображены азимут и угол возвышения всех траекторий спутника, видимых с ALMA, в течение 16-и дневного периода.

РИСУНОК 4

Азимут-угол возвышения траектории Aqua, видимые на ALMA в течение 16-дневного периода



1750-04

Азимут и угол возвышения спутника отмечены для каждых 5 секунд каждого прохождения спутника. Максимальный угол возвышения меньше  $3^\circ$  от зенита в центре ALMA. Хотя данная орбита Aqua может не точно соответствовать конечной орбите CloudSat, статистика позиций спутника будет очень схожей.

#### Мощность, принимаемая антенной ALMA, и результаты для долговечности приемника

Существует четыре класса связи между радаром CloudSat и лепестками антенны ALMA:

- Класс 1: Взаимодействие дальнего бокового лепестка антенны с дальним боковым лепестком. Предполагая уровень боковых лепестков 0 дБи для обеих антенн как радара, так и антенны ALMA, для расстояния 705 км (орбитальная высота CloudSat) и 94 ГГц потери на распространение (между изотропными антеннами) составляют 188,9 дБ. Для мощности (пиковой) передатчика в  $1,8 \text{ кВт} = 32,5 \text{ дБВт}$ , мощность, получаемая в приемной антенне, составит  $32,5 - 188,9 = -156,4 \text{ дБВт}$ . Сравним это с мощностью шума системы в приемнике с полосой 4 ГГц и  $T_{\text{sys}} = 20 \text{ К}$ , которая составит  $kTB = 1,38 \times 10^{-23} \times 20 \times 4 \times 10^9 = 1,10 \times 10^{-12} \text{ Вт} = -119,6 \text{ дБВт}$ . Таким образом, пиковый сигнал боковой лепесток-боковой лепесток около 37 дБ ниже уровня шума системы в полосе 4 ГГц. Таким образом, перегрузки приемника не произойдет, даже для боковых лепестков с уровнем несколько выше 0 дБи. Даже точно на частоте радара ALMA вряд ли обнаружит сигнал в этой полосе.
- Класс 2: Главный лепесток радара – дальний лепесток антенн ALMA. Коэффициент усиления главного лепестка антенны радара составляет 63 дБ. Мощность, получаемая в приемной антенне:  
 $(-188,9 + 32,5) + 63 = -93,4 \text{ дБВт} = -63,4 \text{ дБм}$ .
- Класс 3: Боковые лепестки радара в главный лепесток антенны ALMA:  
 Коэффициент усиления главного лепестка 12-метровой антенны на частоте 94 ГГц при условии 70% эффективности апертуры 80 дБи. Мощность, получаемая этой антенной, направленной на боковые лепестки с уровнем 0 дБи радара, излучающего 32,5 дБВт:  
 $(-188,9 + 32,5) + 80 = -76,4 \text{ дБВт} = -48,4 \text{ дБм}$ .

Сравним эти цифры для связей главный лепесток-боковой лепесток и боковой лепесток-главный лепесток, рассчитанные в классе 2 и классе 3, с эквивалентным тепловым шумом в полосе 4 ГГц приемника, который на входе приемника составит  $-119,6$  дБВт, как рассчитано выше в классе 1. В обоих случаях мощность, принимаемая радаром, на десятки дБ больше, чем шум системы. Это почти наверняка приведет к насыщению приемника ALMA в полосе 3, что означает, что полезные наблюдения будут невозможны, но это не приведет к физическому разрушению. Вследствие движения спутника (скорость движения зоны охвата примерно 7 км/с), такие взаимодействия будут длиться менее одной секунды для любой отдельной антенны или около 2 с, если рассматривать большую конфигурацию ALMA, распространяющуюся на 14 км.

Класс 4: Взаимодействие главный лепесток-главный лепесток. Из цифр, использованных выше, принимаемая мощность (с точностью до дБ)  $(-188,9 + 32,5) + 63 + 80 = -13$  дБВт = 17 дБм = 50 мВт. Это опасный уровень для приемника.

Значение выгорания для полупроводникового смесителя 1 мВт на квадратный микрометр площади перехода. Это для мощности постоянного тока, и следует из испытаний, проведенных несколько лет назад. Приняв в расчет частоту 90 ГГц смесителя, было рассчитано, что 60 мВт на входе приведут к 2 мВт на кв. микрометр, т. е. вдвое больше значения выгорания. Уровень выгорания для импульсной мощности зависит от тепловой постоянной времени перехода, которая неизвестна. Уровень для импульсов в 3,3 мкс может быть измерен, но это нетривиально, так как понадобится специальное приспособление Дьюара, позволяющее инжектировать импульсы постоянного тока. Также было обнаружено, что свыше примерно 160 ГГц, срез волновода на входе рупора приемной антенны должен обеспечивать защиту от сигналов на частоте 94 ГГц.

## Угловое уклонение, необходимое между CloudSat и ALMA

### 1 Повреждение приемника

Антенны ALMA не должны направляться в зенит, когда над ними пролетает CloudSat. Какая дистанция уклонения требуется между антеннами ALMA и главным лепестком антенны CloudSat с точки зрения долговечности приемника? Насколько близко к зениту будет обеспечена безопасность?

Как показано выше, мощность, принимаемая антенной ALMA с точной связью главный лепесток-главный лепесток примерно вдвое превышает вероятный порог разрушения приемника. Несложная задача по защите избежать приема более 10% от этого порога. При условии худшего случая, когда CloudSat пролетает непосредственно над ALMA, это означает, что антенны ALMA должны быть направлены в сторону от зенита, чтобы обеспечить по крайней мере 13 дБ подавления относительно их главного лепестка. Предполагается, что уровень боковых лепестков ниже  $-13$  дБ.

- На частоте 94,05 ГГц 12-метровая параболическая антенна имеет ширину главного лепестка по уровню 3 дБ (полная ширина по половинной мощности (FWHP)) примерно  $0,019^\circ$ , т. е.  $\pm 0,0093^\circ$ . Предполагая гауссовскую форму главного лепестка, точка  $-13$  дБ будет на  $\pm 0,0193^\circ$ .
- Погрешность наведения ALMA или определения "зенит" должно быть меньше  $0,003^\circ$ .
- Большая погрешность в потенциальной ошибке наведения CloudSat; луч радара может отклоняться от местного вектора действия силы тяжести до  $0,07^\circ$  с возможной дополнительной ошибкой наведения в  $0,053^\circ$ . Это дает предел дополнительного отклонения от зенита  $0,053 + 0,07 = 0,123^\circ$ .
- Ширина луча радара по первым нулям составляет  $\pm 0,125^\circ$ .
- Аномальная рефракция: в принципе, аномальные атмосферные условия могут отклонить ожидаемое направление прихода сигнала радара на частоте 94 ГГц до  $0,01^\circ$ .
- Все приемники ALMA для различных полос частот расположены в одной и той же фокальной плоскости с разбросом угла наведения в дальней зоне примерно в  $0,4^\circ$ .
- Некоторые антенны могут иметь наклоняемое малое зеркало, которое может перемещать луч в пределах примерно  $0,05^\circ$ .

- ALMA сама по себе имеет размеры в  $\pm 0,065^\circ$  по долготе и широте, что создает неопределенность, когда угол зенита каждой локальной антенны ориентирован в соответствии с его собственным вектором действия силы тяжести, для надежности нам следует прибавить эту погрешность к запасу надежности.

Сложив все эти допустимые отклонения (отметим, что используется прямое сложение, не квадратическое), мы получим общий запас надежности примерно в  $\sim \pm 0,8^\circ$ . Так что даже для худшего случая прохождения CloudSat непосредственно над ALMA, при обеспечении ненаправления антенн в пределах  $0,8^\circ$  от зенита, приемник ALMA будет защищен от повреждения.

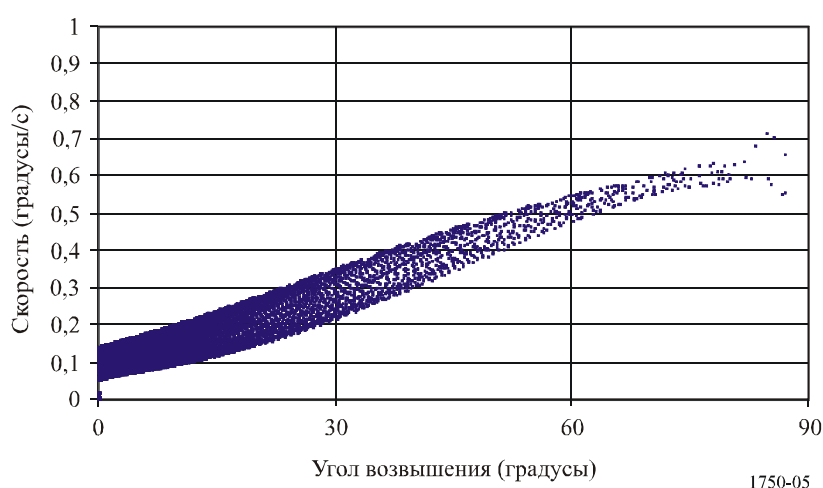
## 2 Помехи

Антенны ALMA не должны направляться на CloudSat в любой момент, когда он находится над горизонтом, во избежание чрезмерных помех. Какое удаление от CloudSat достаточно для снижения помех до приемлемых уровней?

В предшествующих расчетах мощности, получаемой антенной ALMA при направлении главного лепестка антенны ALMA на боковые лепестки CloudSat, принимаемая мощность составляет  $-76,4$  дБВт при мощности теплового шума приемника  $-119,6$  дБВт; т. е. CloudSat на  $(119,6 - 76,4) = 43$  дБ превышает тепловой шум приемника в предполагаемой полосе. Предполагая, что наблюдения не предпринимаются в пределах полосы частот радара, по аналогии с критерием помех МСЭ VLBI, общая мощность помех в полосе частот приемника должна быть меньше 1% от теплового шума, т. е. меньше  $-140$  дБВт. Для этого требуется ослабление на  $43 + 20 = 63$  дБ или уменьшение коэффициента усиления антенны ALMA с 80 дБи до 17 дБи. Из модели МСЭ-R SA.509 огибающей боковых лепестков это предположительно произойдет примерно в  $4^\circ$  от главного лепестка; однако эта модель антенны рассчитана лишь на использование в диапазоне 1–30 ГГц. Из измерений на 30-метровом телескопе в полосе 39 ГГц показано, что безопасное смещение от пределов коэффициента усиления 17 дБи составляет 10 градусов. Таким образом, чтобы избежать чрезмерных помех в полосе ALMA 90 ГГц, вне частоты CloudSat, антенны ALMA не должны подходить ближе, чем  $\pm 10^\circ$  к CloudSat всякий раз, когда радар находится над горизонтом.

РИСУНОК 5

Ряд угловых скоростей Aqua/CloudSat, видимых с ALMA,  
как функция от угла возвышения спутника



Это позволяет рассчитать продолжительность помех. При угле возвышения в  $30^\circ$ , если спутник проходит близко к главному лепестку ALMA, можно ожидать продолжительности помех примерно в 70 секунд.

Если выполняются наблюдения в полосе 90 ГГц, когда CloudSat проходит в пределах  $10^\circ$  от поля зрения ALMA, данные должны быть отмечены как подверженные сомнению. На рисунке 5 показан ряд угловых скоростей спутника, видимых с ALMA, в градусах/секундах, как функция от угла возвышения спутника. Это позволяет рассчитать возможную продолжительность помех для случаев, где спутник проходит близко, т.е. в пределах  $\pm 10^\circ$  от лепестка ALMA. Для более высокого прохождения спутника этот промежуток помех может длиться до 30 секунд, в то время как для спутника, проходящего рядом с лепестком ALMA с углом возвышения  $30^\circ$ , помехи могут длиться около 70 секунд, а при более низких возвышениях еще больше.

### 3 Гармоники

Амплитуды 2-й и 3-й гармоник (188,1 ГГц и 282,15 ГГц) передатчика CloudSat неизвестны, но можно логично предположить, что их уровень будет на 50–60 дБ ниже основной частоты. EIRP для главного лепестка неопределена: в принципе, коэффициент усиления антенны вдоль оси сканирования для 2-й гармоники может быть на 6 дБ выше, а для 3-й гармоники на 10 дБ выше, чем для основной гармоники, хотя маловероятно, что антенна CloudSat будет оптимально излучать на частотах гармоник, более вероятно, что оставшаяся энергия гармоник будет распределена по боковым лепесткам передатчика. Обеспечив ненаведение CloudSat в пределах главного лепестка антенны ALMA (или скажем, в пределах  $0,02^\circ$ ), помехи от гармоник CloudSat могут стать проблемой строго лишь для характерных частот гармоник. Вероятность наведения ALMA так близко к движущемуся CloudSat очень мала, и такие помехи могут присутствовать на любой отдельной антенне менее одной секунды для данного прохода спутника. Тем не менее, программное обеспечение ALMA должно, вероятно, отметить такой случай.

### 4 Влияние на ALMA

Здесь приведены шаги, которые необходимо предпринять для ALMA с целью избежать: а) повреждения приемников и б) искажение данных.

- Антенна ALMA никогда не должна направляться в пределах  $\pm 0,8^\circ$  от зенита. Если это когда-либо понадобится, скажем для технического обслуживания или для транспортировки, то над входом приемника должна быть установлена защитная задвижка или солнечный аттенюатор. Если необходимы измерения в пределах  $0,8^\circ$  от зенита, то управляющим программным обеспечением должно быть проверено местонахождение CloudSat перед тем, как позволить слежение ближе к зениту.
- Всякий раз, когда антенны ALMA направлены в пределах  $10^\circ$  от спутника CloudSat, любые данные, собранные по крайней мере в полосе частот 90 ГГц, должны быть автоматически отмечены как имеющие сомнительные значения. Возможны гармонические помехи, если CloudSat проходит в пределах  $0,02^\circ$  от поля зрения ALMA.
- Наблюдения в диапазоне частот 94,0–94,1 ГГц желательно ограничить периодами времени, когда CloudSat находится ниже горизонта.

### Заключение

CloudSat – первый из серии радаров с миллиметровыми длинами волн, которые могут оказывать влияние на ALMA. Существует небольшой риск повреждения приемников ALMA, что может произойти, если луч радара и антенна ALMA когда-нибудь будут направлены непосредственно друг на друга со связью главный лепесток-главный лепесток. Однако такой случай крайне редок, и простые меры предосторожности позволяют полностью избежать опасности, в частности, если антенны ALMA никогда не направлены в пределах  $0,8^\circ$  от зенита без использования защиты приемника или без предварительной проверки управляющим программным обеспечением, невозможно ли прохождение земной траектории CloudSat близко к ALMA.

Помехи через дальние боковые лепестки луча радара будут возникать в пределах полосы 90 ГГц всякий раз, когда ALMA направлена в пределах  $10^\circ$  от спутника; должна существовать возможность отметки программным обеспечением ALMA таких случаев.

На протяжении эксплуатационного ресурса CloudSat обсерватория ALMA будет запрашивать сведения о новейших факторах орбиты, чтобы сделать возможным прогнозирование точных координат спутника и их использование программным обеспечением диспетчеризации телескопа, управления и сбора данных.

В данном случае необходимо начальное и дальнейшее тесное сотрудничество между спутниковым агентством и РАС, и оно будет необходимо при любых подобных ситуациях в будущем.

---