

С. Каппеллин (С. Cappellin)
 П. Г. Николачи (P. G. Nicolaci)
 С. Б. Сёренсен (S. B. Sørensen)
 В. Х. Ятман (W. H. Yatman)
 М. М. Билгич (M. M. Bilgic)
 Д. Трента (D. Trenta)
 Л. Роло (L. Rolo)

Детальная электрическая конструкция

нового высокоэффективного компактного антенного испытательного стенда с компенсатором

Описывается детальная электрическая конструкция нового компактного антенного испытательного стенда с компенсацией (CATR), который будет установлен в измерительном комплексе HERTZ 2.0 Европейского космического агентства (ESA). CATR отвечает жестким требованиям по общей амплитудной пульсации от пика до пика 0,5 дБ и фазовой пульсации 4° в диапазоне 1–400 ГГц. Для проектирования системы был использован новый подход, использующий первоначальный компромисс с трассировкой лучей и последующий детальный полноволновый анализ и оптимизацию профиля, длины и ориентации зубцов.

В статье описан выбор, сделанный при проектировании, и показаны детальные характеристики в L-диапазоне.

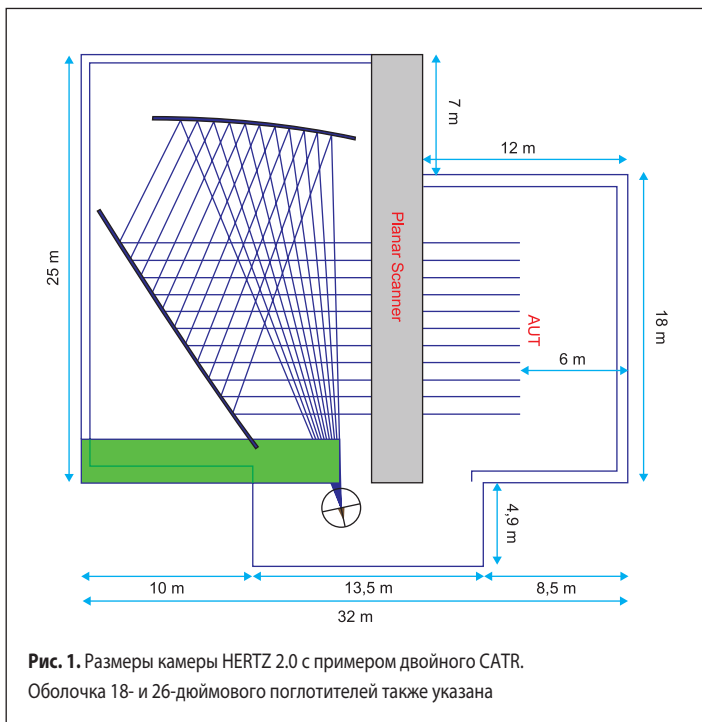
Введение

Компактный антенный испытательный стенд (Compact Antenna Test Range, CATR) — это антенная измерительная система, состоящая из одного или двух отражателей, освещаемых фидом и генерирующих почти идеальную плоскую волну, называемую спокойной зоной (QZ). Тестируемая антенна (AUT) помещается в спокойную зону, и ее измеряемая диаграмма направленности является результатом взаимодействия между полем апертуры AUT и полем спокойной зоны [1, 2]. В идеальных условиях поле спокойной зоны представляет собой идеальную плоскую волну с равномерной амплитудой и постоянной фазой. На практике конусность фиды, конечная точность поверхности отражателей и дифракция от их краев вносят пульсации в равномерное распределение поля спокойной зоны по амплитуде и фазе.

С помощью компактных антенных испытательных стендов можно измерять диаграмму направленности дальнего поля тестируемой антенны (AUT) в контролируемой среде. Более того, измерения CATR не требуют коррекции зонда, преобразования ближнего поля в дальнее и точного механического выравнивания и, таким образом, выполняют измерение диаграммы направленности за значительно меньшее время, чем в ближнем поле. Благодаря этим многочисленным преимуществам и несмотря на погрешности измерений, обусловленные неидеальной спокойной зоной, CATR являются наиболее широко используемыми установками для определения полезной нагрузки и антенных измерений [3].

В начале 1990-х годов первый очень большой компенсированный CATR для измерений полезной нагрузки (CPTR) был разработан компанией TICRA и установлен в Европейском космическом агентстве в Ноордвейке в Нидерландах. Этот стенд находится в комплексе HERTZ [4], который в настоящее время также оснащен системой ближнего поля для планарных, цилиндрических и сферических измерений ближнего поля, использующей один и тот же позиционер антенны. ESA CPTR была новаторской установкой, которая до настоящего времени выполняла бесчисленные измерения антенн и полезных нагрузок в диапазоне 4–24 ГГц. Установка постоянно поддерживалась в рабочем состоянии и недавно модернизирована с помощью перегородки и системы SERAP (защита от ссерационного излучения) [5] для повышения точности измерений.

Однако нынешние и будущие спутниковые миссии работают в гораздо более широком диапазоне частот и требуют более высокой точности измерений, чем та, что доступна в ESA CPTR. Поэтому возникла необходимость в новом измерительном комплексе с CATR для высокопроизводительных измерений полезной нагрузки и антенн в диапазоне 1–400 ГГц. Объект получит название HERTZ 2.0 и будет представлять собой современный испытательный центр, включающий также лаборатории субмиллиметровых волн, оптики и оптоэлектроники. CATR для HERTZ 2.0 потребовался индивидуальный проект, чтобы отвечать жестким электрическим требованиям, предъявляемым Агентством, и в то же время соответствовать геометрическим ограничениям, связанным с размерами имеющегося помещения.



Благодаря своему богатому опыту в проектировании систем отражателей и прогрессу, достигнутому программными инструментами ВЧ-моделирования за последнее десятилетие [6], компания TICRA была назначена разработчиком электрического проекта нового CATR для будущей установки HERTZ 2.0.

Цель настоящей работы — описать подход, использованный в электрическом проектировании, и показать подробный полноволновый анализ CATR в L-диапазоне. В частности, будут перечислены и обсуждены требования, выдвинутые Агентством, а также кратко описаны компромиссы при проектировании, которые позволили определить перспективного кандидата, представлена детальная электрическая схема, показаны характеристики спокойной зоны в L-диапазоне и сделаны обобщающие выводы.

Требования к разработке

Агентство установило ряд электрических и геометрических требований для HERTZ 2.0 CATR, которые будут рассмотрены далее.

Геометрические требования

Размеры радиоанэхогенной камеры показаны на рис. 1. Помимо CATR, в камере будет установлен планарный сканер, создающий запретную зону шириной 3 м. Для подачи фидов планируется специальное помещение (рис. 1 внизу), с возможностью работы как в номинальном положении, так и в смещенном положении для сканирования до $\pm 5^\circ$. Суботражатель показан в верхней части рисунка и должен находиться в верхней секции размером 7×20 м для уменьшения дифракции в спокойную зону. Общая высота помещения составляет 18 м. Зеленая область обозначена в нижней левой части рисунка. Это объем на уровне пола с квадратным сечением $2,5 \times 2,5$ м, предназначенный для транспортировки оборудования в спокойную зону, которая, таким образом, должна оставаться свободной. Кроме того, позиционер будет размещен на расстоянии 6 м от торцевой стены. Между отражателями и стенами требуется зазор не менее 18 дюймов, чтобы обеспечить место для 18-дюймовых поглотителей, в то время как остальные стены будут покрыты 26-дюймовыми поглотителями.

Электрические требования

Новый CATR для установки HERTZ 2.0 должен работать в диапазоне 1–400 ГГц и представлять собой компенсированную систему с двойным отражателем с зубцами, обеспечивающую низкую кросс-поляризацию и малые aberrации сканирования во всех диапазонах. В отличие от CATR с одним отражателем, которые могут быть разработаны по нескольким правилам [3], компенсированная система с двумя

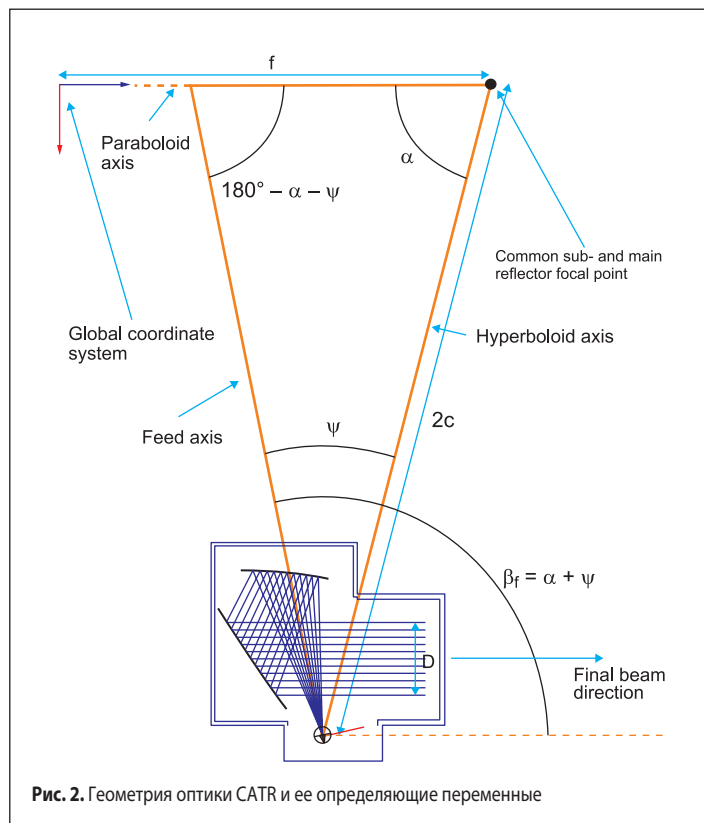
отражателями требует тщательного электрического моделирования с использованием специального программного обеспечения [7], что мы и будет рассмотрено далее. В L-диапазоне общая амплитуда от пика до пика (PtP) и фазовая пульсация поля спокойной зоны должны быть меньше 0,5 дБ и 4° соответственно. Для частот выше, чем L-диапазон, требования к общей пульсации PtP спокойной зоны составляют 0,4 дБ и 4° соответственно. Следует отметить, что эти требования в два раза строже, чем те, которым отвечают системы COTS CATR, например [8, 9], особенно в L-диапазоне. Более того, это общие требования PtP, включающие как влияние сужения фида, так и влияние краевой дифракции отражателя, которые обычно оцениваются отдельно. Для выполнения данных требований фид должен иметь очень плоскую форму, а зубцы должны быть тщательно разработаны, чтобы свести дифракцию к минимуму. Наконец, размер спокойной зоны должен быть не менее 5×5 м с глубиной 9 м, а ее центр должен находиться на одинаковом расстоянии от потолка, пола и боковых стен.

Компромиссы при проектировании

Основной и суботражатель расположены в так называемой компенсированной конфигурации, удовлетворяющей условию Мизугучи. Более того, при работе CATR с несколькими фидами одновременно плоская волна в спокойной зоне будет сканировать фиды, не расположенные в фокальной точке. Желательно, чтобы сканирование составляло до $\pm 5^\circ$. Это приводит к увеличению размеров суботражателя для уменьшения перетекания и поддержания высокого качества фронта сканированной плоской волны. Наконец, конструкция должна быть выполнена таким образом, чтобы вывести нежелательный трижды отраженный луч (от фида к основному, затем к суботражателю и наконец к основному) из спокойной зоны.

Геометрия оптики показана на рис. 2. Основной отражатель представляет собой смещенный параболоид с фокусным расстоянием f и диаметром D (без зубцов), а суботражатель — вогнутую ветвь гиперболоида с межфокусным расстоянием $2c$ и эксцентриситетом e . Фид расположен в одной из фокусных точек гиперболоида, а другая фокусная точка совпадает с фокусной точкой параболоида. Ось гиперболоида наклонена на угол α по отношению к оси параболоида, а ось фиды наклонена на угол ψ по отношению к оси гиперболоида.

Налагая требование, чтобы углы α и ψ были связаны так называемым условием Мизугучи, можно получить систему, оптически эквивалентную вращательно-симметричной системе с одним отражателем, обе-



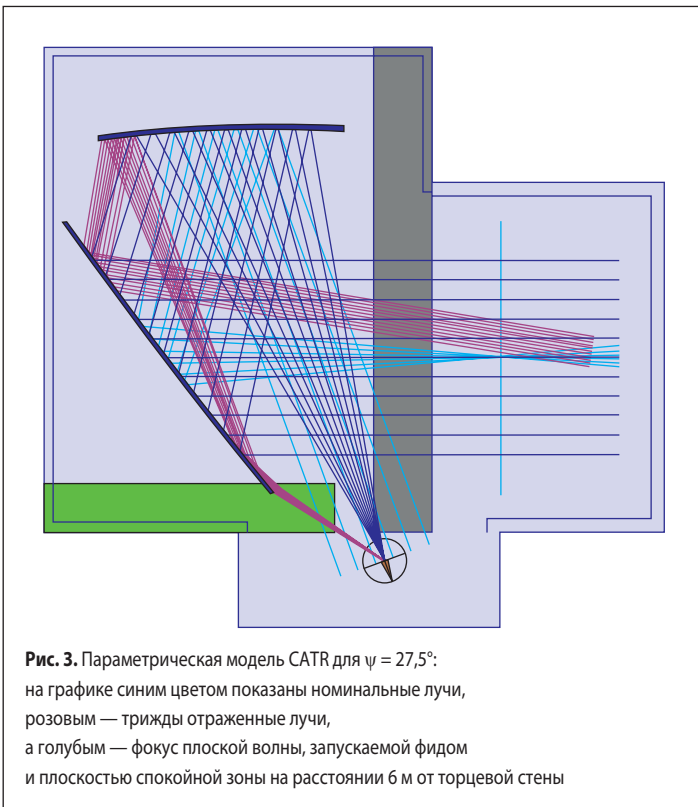


Рис. 3. Параметрическая модель CATR для $\psi = 27,5^\circ$: на графике синим цветом показаны номинальные лучи, розовым — трижды отраженные лучи, а голубым — фокус плоской волны, запускаемой фидом и плоскостью спокойной зоны на расстоянии 6 м от торцевой стены

спечающую низкую кросс-поляризацию и малые aberrации сканирования. Условие Мизугучи записывается в виде

$$\tan(\psi/2) = M \tan(\alpha/2), \quad (1)$$

где $M = (e + 1)/(e - 1)$ — коэффициент усиления, а e — эксцентриситет гиперболоида. Для вогнутой ветви гиперболоида эксцентриситет становится отрицательным числом меньше -1 . На рис. 2 введен угол β_f между осью фида и конечным направлением луча. Он является полезной переменной при проектировании и связан с α и ψ через $\beta_f = \alpha + \psi$. Отмечается, что конечное направление луча параллельно оси параболоида главного отражателя. В целом, геометрия CATR определяется следующими шестью параметрами:

- D — диаметр главного отражателя (без зубцов);
- f — фокусное расстояние параболоида основного отражателя;
- $2c$ — фокусное расстояние гиперболоида суботражателя;
- e — эксцентриситет суботражателя;
- α — угол между осями основного и суботражателя;
- ψ — угол между осью фида и осью суботражателя.

Поскольку условие Мизугучи дает ограничение между углами и эксцентриситетом, число параметров сокращается до пяти и на их основе можно рассчитать геометрию системы отражателей.

Приведенные выше расчетные формулы использованы для реализации параметрической модели CATR в программе GRASP [10] для изучения методом трассировки лучей влияния пяти переменных относительно геометрических и электрических ограничений и поиска оптимального набора значений, которые могут переместить трижды отраженный луч в сторону от QZ. Пример трассировки лучей для определенного набора значений показан на рис. 3.

После этого была изучена геометрия зубцов. В целом, от CATR требуется, чтобы спокойная зона была как можно больше и как можно более плоской. Размер спокойной зоны контролируется размером основного отражателя, а ее плоскостность — конусностью фида и уровнем дифракции от краев отражателей, которые сильно освещены структурой фида. Для уменьшения краевой дифракции и/или направления ее в сторону от спокойной зоны на краях отражателей используются два распространенных решения — зубчатые и закругленные края [11]. Для HERTZ 2.0 CATR были рассмотрены зубцы с такой же поверхностью (параболоид/гиперболоид) отражателя. Длина и ширина зубцов определяется самой низкой частотой, на которой должен работать CATR —

в нашем случае L-диапазон. Длина зубцов определяет, насколько хорошо токи сводятся к нулю и, следовательно, насколько плавным становится переход через границу отражения в спокойной зоне. Лучше всего использовать длинные зубцы. Если ширина слишком мала, электрическое поле, поляризованное ортогонально к длине зубцов, не сможет индуцировать токи на зубцах, и зубцы не будут иметь никакого эффекта. Было установлено, что для самой низкой частоты 1 ГГц требуется длина не менее пяти длин волн и ширина более одной длины волны.

Детальный электрический расчет

С параметрами, определенными в результате компромиссов, построена подробная модель CATR в GRASP для точного описания поверхности и обода отражателей и каждой зубчатой кромки. Окончательная конструкция CATR получена с проведением серии оптимизаций в TICRA Tools SW в L-диапазоне с точки зрения поверхности, профиля, длины и ориентации зубцов, а также освещенности суботражателя для полного соответствия геометрическим ограничениям комнаты и максимально возможного приближения к требуемым общим характеристикам амплитудных и фазовых пульсаций. Сначала был использован глобальный метод многоуровневого поиска координат (MCS), а затем локальный $\min\max$. Поскольку CATR должен работать уже на частоте 1 ГГц, методы высокочастотного анализа, такие как физическая оптика (PO) и физическая теория дифракции (PTD), были бы неточными [6], поэтому волновой анализ всей системы стал единственным вариантом. Таким образом, все анализы и оптимизации, выполненные на этапе детального проектирования в L-диапазоне, реализованы с использованием решателя высшего порядка MoM/MLFMM коммерчески доступного продукта ESTEAM SW в составе пакета TICRA Tools [12, 13]. Рассматривая кластер, образованный основным и суботражателем, можно учесть связь между соседними зубцами, связь между основным и суботражателем и прямое освещение основного отражателя фидом на всех этапах оптимизации. Прямое освещение фиды в спокойной зоне (QZ) всегда игнорировалось, поскольку он будет затенен перегородкой. Анализ MoM/MLFMM-отражателей CATR с зубцами на частоте 1,1 ГГц использовал 4,7 Гбайт оперативной памяти и выполнялся за 9 мин на ноутбуке с процессором Intel Core i7 2,3 ГГц. Отражатели освещаются по схеме фиды, показанной на рис. 4, которая характеризуется плоской областью вокруг прямого направления и высокой конусностью, что обеспечивает почти постоянную освещенность суботражателя и низкую освещенность зубцов суботражателя. Таким образом поддерживается оптимальная освещенность основного отражателя и низкий уровень пульсаций в спокойной зоне. Эта же схема используется на всех частотах L-диапазона.

Окончательные варианты основного и суботражателя показаны на рис. 5 и 6. Основной отражатель имеет общий размер $18,5 \times 16,1$ м с 32 зубцами длиной около 3 и шириной 1,5 м. Зубцы основного отражателя имеют острый косинусный профиль и наклон для направления дифракции в сторону от QZ. Суботражатель имеет общий размер $15,2 \times 14,4$ м с 40 зубцами длиной около 1,5 м и острым косинусным профилем.

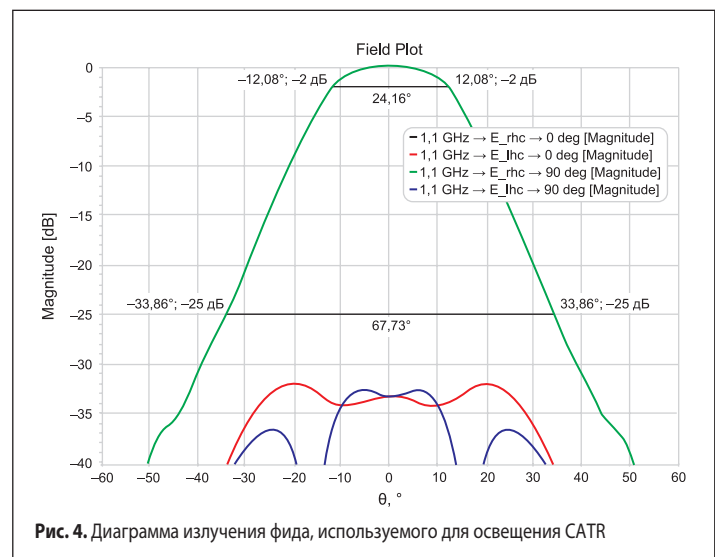


Рис. 4. Диаграмма излучения фиды, используемого для освещения CATR

Детальный радиочастотный анализ

Срез двух главных плоскостей QZ на расстоянии 6 м от торцевой стены показан на рис. 7, где вертикальные пунктирные линии ограничивают область QZ на расстоянии 5 м, а горизонтальные сплошные линии — интервал пик-пик 0,5 дБ. Характеристики CATR перечислены в табл. 1 по амплитуде и фазе. Проценты рассчитаны с помощью МоМ/MLFMM по сетке с 109×109 точками над спокойной зоной 5×5 м с шагом дискретизации 45,87 мм. Видно, что пик-пик 0,5 дБ достигается в L-диапазоне более чем для 89,9% точек QZ, а пик-пик 4° достигается более чем для 82,4% точек QZ. Следует отметить, что PtP (%) являются наихудшими значениями, так как на практике излучение суботражателя в направлении спокойной зоны будет частично затенено поглотителями на стене, параллельной спокойной зоне, которые не учитывались в анализе. Также повторяем, что PtP (%) не учитывают прямое поле излучения в QZ, которое будет затенено перегородкой.

Наконец, интересно посмотреть, насколько хорошо физическая оптика (PO) согласуется с полноволновым методом моментов (МоМ) в L-диапазоне. Чтобы лучше понимать вклад поля в спокойную зону, метод моментов применяется двумя способами: во-первых, при рассмотрении кластера, заданного двумя отражателями, для учета взаимного воздействия между отражателями, как это сделано в других разделах статьи. Во-вторых, как «последовательный» МоМ, где используется тот же последовательный подход физической оптики, и, таким образом, не учитывается взаимная связь между основным и суботражателем, но используется полная волна на отдельных отражателях. Цель «последовательного» МоМ-анализа — изучить эффект связи между зубцами, принадлежащими одному отражателю, который не учитывается в решении физической оптики, и убедиться, что все поля, вносящие вклад в спокойную зону, учтены. Список всех вкладов полей, использованных в последовательных МоМ и PO, приведен в табл. 2.

Результаты на рис. 8 показывают, что полный МоМ (черная кривая) идентичен последовательному МоМ (красная кривая) и, соответственно, взаимное воздействие между отражателями незначительно и последовательный МоМ правильно описывает все поля, вносящие вклад в спокойную зону. Мы также видим, что удаление вкладов 2, 3 и 5х из последовательной МоМ (синяя кривая) не приводит к существенному изменению результатов. Таким образом, в данной конструкции нам не нужен SERAP между фидом и основным отражателем и трижды отраженным лучом можно пренебречь. График также показывает,

Таблица 1. Процент амплитудных и фазовых точек в пределах требований к пульсациям на расстоянии 6 м от торцевой стены

Частота, ГГц	0,5 дБ, PtP, %	4°, PtP, %
1,1	89,9	82,4
1,2	90,8	88,5
1,5	96,7	94,6

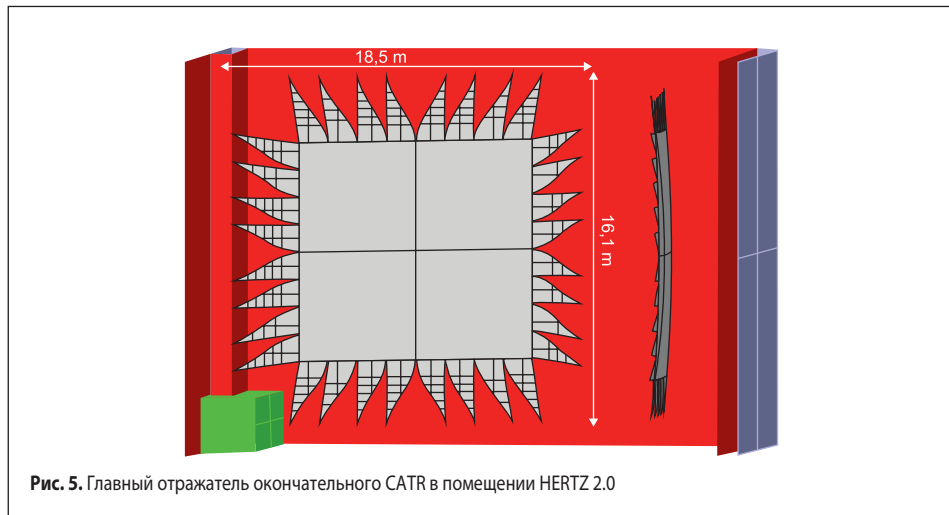


Рис. 5. Главный отражатель окончатального CATR в помещении HERTZ 2.0

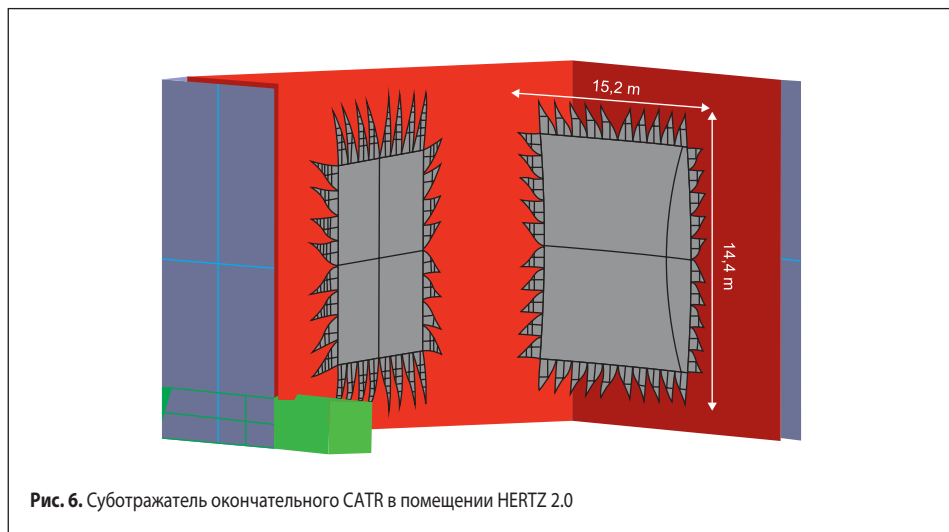


Рис. 6. Суботражатель окончатального CATR в помещении HERTZ 2.0

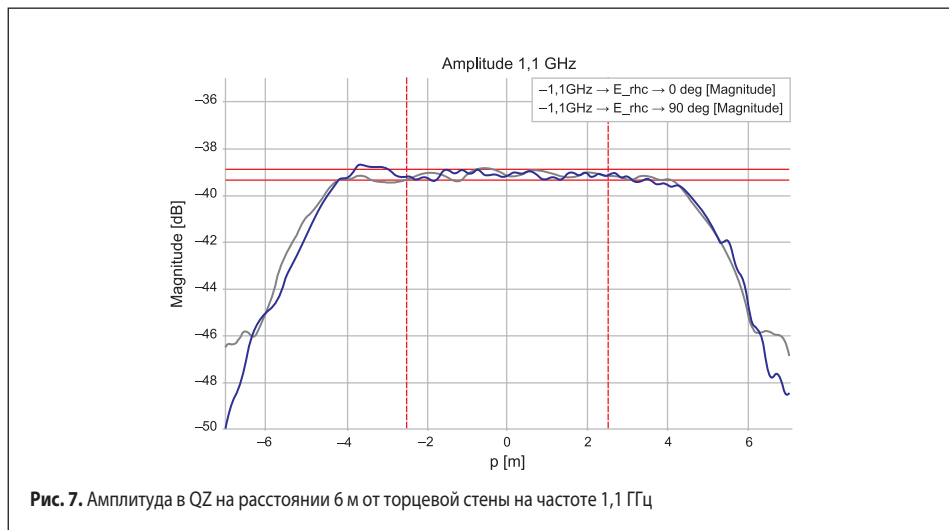
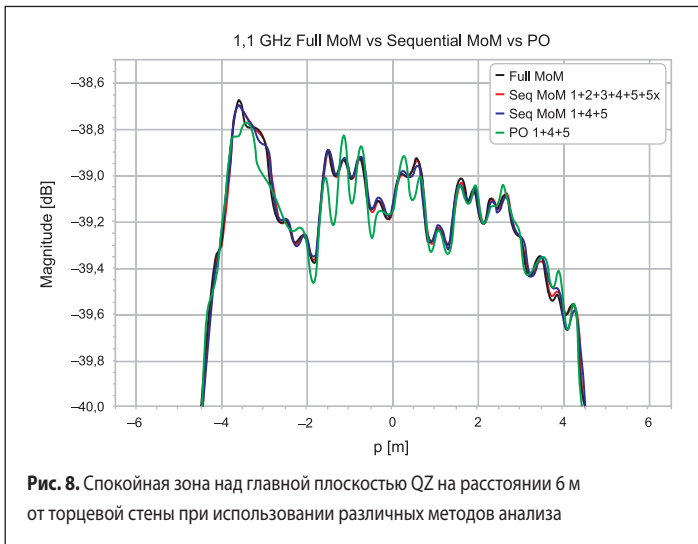


Рис. 7. Амплитуда в QZ на расстоянии 6 м от торцевой стены на частоте 1,1 ГГц

Таблица 2. Вклады полей в PO и последовательный МоМ

#	Вклад	Примечание
1	Фид → суб → основной → QZ	Номинальное поле
2	Feed → основной → QZ	В принципе должен быть заблокирован SERAP. В этом случае CATR предназначен для того, чтобы сделать этот вклад пренебрежимо малым
3	Фид → основной → суб → основной → QZ	Трижды отраженный луч, в данном случае CATR разработан таким образом, чтобы сделать этот вклад пренебрежимо малым
4	Фид → суб → QZ	Номинальное поле, основная причина пульсаций в QZ. Часть этого поля на практике будет затенена стеной
5	Фид → суб → основной → суб → QZ	Дополнительный отскок, вызывает пульсацию в QZ
5x	Фид → суб → основной → суб → основной → QZ	Дополнительный отскок для проверки точности



что результаты PO (зеленая кривая) неточны в L-диапазоне, как и ожидалось, поскольку решение PO не учитывает связь между соседними зубцами, существенную в L-диапазоне.

Выводы

В статье описывается детальный радиочастотный расчет и анализ нового CATR для измерительного комплекса HERTZ 2.0 Европейского космического агентства, специально разработанного компанией TICRA для удовлетворения геометрических и электрических требований, установленных Агентством. CATR представляет собой компенсированную систему двойного отражателя с зубчатыми краями, с параболоидом в качестве основного отражателя и гиперболоидом в качестве суботражателя, работающую в диапазоне 1–400 ГГц. Зубцы имеют одинаковую поверхность отражателей, острые края, без зазоров между ними, и слегка наклонены. Электрический расчет выполнен с помощью нового

подхода, использующего первоначальный компромисс с трассировкой лучей в GRASP SW и последующий детальный полноволновый анализ и оптимизацию профиля, длины и ориентации зубцов в ESTEAM SW, обе программы коммерчески доступны в пакете TICRA Tools.

Литература

1. Yaghjian A. D. Efficient computation of antenna coupling and fields within the near-field region // *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*. Jan. 1982. Vol. AP-30. No. 1.
2. Cappellin C., S. Sørensen B., Paquay M., Østergaard A. An accurate and efficient error predictor tool for CATR measurements. *Proc. EuCAP 2010, Barcelona, Spain, April 2010*.
3. Parini C., Gregson S., McCormick J., van Rensburg D. J. *Theory and Practice of Modern Antenna Range Measurements*, IET, 2014.
4. *Antenna Measurements Facilities at ESTEC*. https://esamultimedia.esa.int/docs/space_engineering/Antenna_Measurement_Facilities.pdf
5. Cappellin C., Nielsen P. H., Trenta D., Rolo L. *Baffle and SERAP design for Compact Antenna Test Ranges*. *Proc. EuCAP 2019, London, United Kingdom, 2019*.
6. Borries O., Meincke P., Jørgensen E., Viskum H.-H., Jensen F., Schmidt C. H. *Design and validation of compact antenna test ranges using computational EM*. *Proc. AMTA conference, Long Beach, USA, 2015*.
7. Schmidt C. H., Geise A., Migl J., Steiner H.-J., Viskum H.-H. *A detailed PO/PTD GRASP simulation model for compensated compact range analysis with arbitrarily shaped serrations*. *Proc. AMTA Conference, Columbus, USA, 2013*.
8. <https://www.nsi-mi.com/products/compact-range-reflectors>
9. <https://www.compactrange.de/index.php/testi-facility/detailed-description>
10. *GRASP software*. <https://www.ticra.com/software/grasp/>
11. Muñoz-Acevedo A., Burgos S., Sierra-Castañer M. *Performance comparison between serrated edge and rolled edge reflectors inside CATR facilities*. *Proc. EuCAP 2011, Barcelona, Spain, 2011*.
12. Jørgensen E., Volakis J., Meincke P., Breinbjerg O. *Higher Order Hierarchical Legendre Basis Functions for Electromagnetic Modeling* // *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*. Nov. 2004. Vol. 52. No. 11.
13. *ESTEAM software*. <https://www.ticra.com/software/esteam/>