

# Рассеяние терагерцовых волн объектами сложной конфигурации с использованием Новосибирского лазера на свободных электронах

А. Г. Черевко, В. В. Кубарев, Г. Н. Кулипанов, Е. М. Ильин,  
А. И. Полубехин, Ю. В. Моргачев

Рассмотрены возможности использования Новосибирского лазера на свободных электронах (НЛСЭ) в качестве источника излучения в специальной установке, предназначенной для измерения эффективной площади рассеяния (ЭПР) уменьшенных моделей трехмерных объектов, с целью оценки ЭПР этих объектов в терагерцовом диапазоне частот. Приведены результаты измерения ЭПР различных моделей.

*Ключевые слова:* лазер на свободных электронах, эффективная площадь рассеяния, терагерцовое излучение.

## 1. Введение

Эффективная площадь рассеяния (ЭПР, соответствующий английский термин – radar cross-section (RCS)) является одной из важнейших характеристик объектов в радиолокации, поскольку определяет возможность его обнаружения и опознавания. Поэтому технологии определения ЭПР непрерывно развиваются. Появление мощных вычислительных машин и специальных эффективных алгоритмов привело к развитию численных методов расчета ЭПР, но в настоящее время приемлемые по точности значения могут быть получены только для относительно простых объектов. К тому же, как известно, не существует иных способов проверки точности расчетов для сложного объекта, кроме их сравнения с экспериментом. Кроме этого, ввиду важности параметра ЭПР для локации, даже предполагаемые точные численные расчеты необходимо будет подтверждать экспериментальной проверкой. Поэтому традиционные экспериментальные методики продолжают совершенствоваться наряду с созданием новых методик.

К традиционным методам, в первую очередь, относятся натурные эксперименты на специально созданных полигонах, как государственных, где испытывается оборонная техника [1], так и полигонах крупных корпораций, например, Lockheed Martin [2] или The Howland Company [3], где измерялась ЭПР самолета F-35 (рис. 1).

Недостатки полигонных методов очевидны: это большие затраты, влияние конструкции опоры на результат, влияние окружающих объектов, приводящих к переизлучению.

В настоящее время для определения ЭПР сложных объектов применяют сочетание расчетных и экспериментальных методов, что позволяет расширить возможности расчетных методов и снизить стоимость экспериментальных работ.



Рис. 1. Установка для натурных измерений ЭПР самолета F-35

Уровень соответствия расчетных и экспериментальных результатов можно понять из представленных ниже данных для достаточно простых объектов, а именно: модели секции ракеты, представляющей собой алюминиевый цилиндр с четырьмя стабилизаторами в виде прямоугольных пластин [4] (рис. 2а), стилизованной модели квадрокоптера с малым числом металлических деталей [5] (рис. 2б), стилизованной гладкой металлической модели самолета [6] (рис. 3).

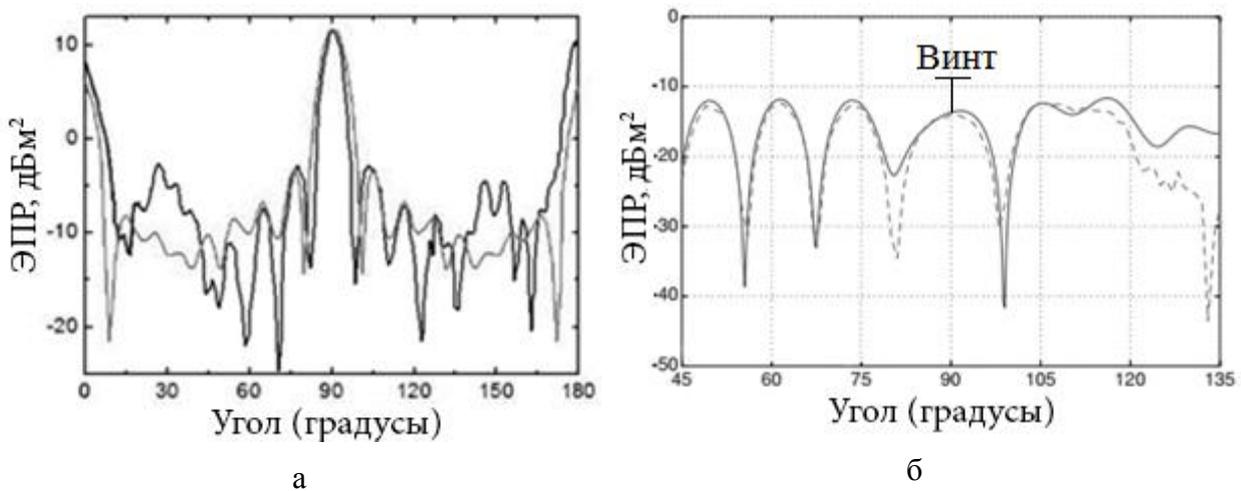


Рис. 2. Соответствие результатов компьютерного расчета ЭПР экспериментальным результатам, сантиметровый диапазон; черная сплошная линия – эксперимент, серая – расчет.

а – модель секции со стабилизаторами стилизованной гладкой алюминиевой ракеты: вращение вокруг оси перпендикулярной образующей, на графике: ЭПР передней части модели (кольцо) – (0°), ЭПР боковой части модели с металлической пластиной – стабилизатором (90°), ЭПР сопла – (180°).

б – стилизованная модель квадрокоптера с малым числом металлических деталей

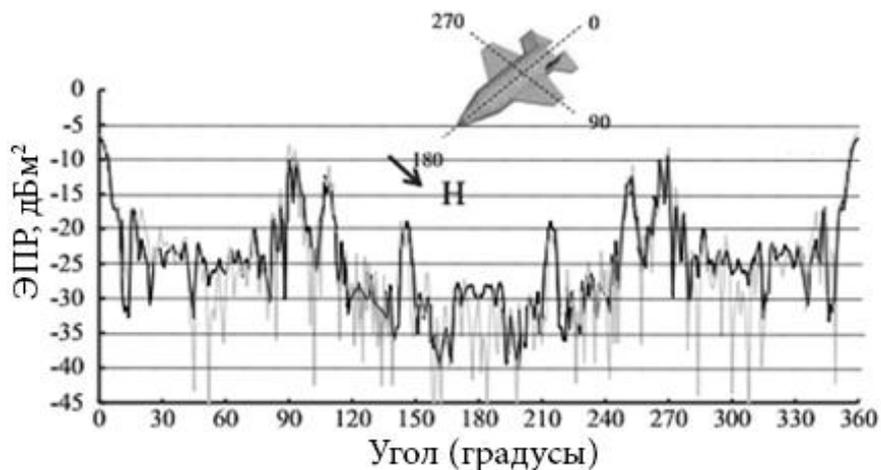


Рис. 3. ЭПР стилизованной модели металлического самолета, сантиметровый диапазон; черная линия – расчет, серая – эксперимент

Как видно из рисунков, даже для таких, относительно простых, моделей соответствие результатов компьютерного моделирования экспериментальным данным по ЭПР не может считаться хорошим.

Таким образом, развитие новых экспериментальных методов, позволяющих получить данные по ЭПР сложных объектов, особенно в зоне Фраунгофера (дальней зоне), в которой, как правило, работают РЛС, является актуальной задачей.

## 2. Методика измерения ЭПР в терагерцовом диапазоне и экспериментальная установка

Определение ЭПР сложных объектов  $S_0^*$  при заданной длине волны излучения  $\lambda_0$  по значению ЭПР точной уменьшенной модели объекта  $S_M^*$ , измеренной с использованием излучения с более короткой длиной волны  $\lambda_M < \lambda_0$  (масштабное моделирование) является традиционным [7]. Искомая ЭПР определяется по соотношению

$$S_0^* = \frac{\lambda_0^2}{\lambda_M^2} S_M^*. \quad (1)$$

Для строгого выполнения соотношения (1) необходимо, чтобы диэлектрическая и магнитная проницаемость объекта и его макета были одинаковы, а электропроводность макета  $\sigma_M$  соответствовала соотношению  $\sigma_M = (\lambda_0/\lambda_M)\sigma_0$ , где  $\sigma_0$  – электропроводность объекта. Для объектов с высокой электропроводностью эти ограничения не оказывают существенного влияния на результат, если обеспечена высокая поверхностная электропроводность макета [7].

Использование терагерцового (ТГц) диапазона для масштабного моделирования могло бы существенно упростить определение ЭПР объектов большого размера (порядка и более 10 м) для миллиметрового, сантиметрового и дециметрового диапазонов, поскольку модели этих объектов в ТГц-диапазоне имели бы удобные для проведения экспериментов малые размеры ( $l_M = (\lambda_M/\lambda_0)l_0$ ). Такие работы в настоящее время ведутся с использованием источников ТГц-излучения на базе фемтосекундных лазеров [8, 9].

Основными недостатками этого направления являются: малая мощность ТГц-излучения, очень широкий спектральный диапазон излучения, отсутствие возможности непрерывной регулировки частоты источника излучения в широких пределах. Эти недостатки снижают точность и надежность результата измерения. Становится проблематичным измерение ЭПР модели в дальней зоне, а именно эти данные имеют практическую значимость для локационных задач.

Альтернативным направлением, предлагаемым и развиваемым авторами, может служить использование при подобных измерениях в качестве источника ТГц-излучения лазера на

свободных электронах (ЛСЭ), который лишен перечисленных недостатков. Таким источником может служить Новосибирский ЛСЭ, который является самым мощным в мире источником ТГц-излучения [10]. Его основные характеристики в пользовательском режиме работы в ТГц-диапазоне приведены в табл. 1.

Таблица 1. Характеристики Новосибирского ЛСЭ

п/п	Параметр	Величина
1	Средняя мощность	100 – 300 Вт
2	Пиковая мощность	300 – 900 кВт
3	Частота повторения импульсов	5.6 МГц
4	Длительность импульса	(60 ... 100) пс
5	Диапазон перестройки длин волн, $\lambda$ , (частот)	(0.03 – 0.24) мм (1.3 – 10.0) ТГц
6	Относительная ширина спектра	0.2 – 0.5 %
7	Исходная поляризация (степень поляризации излучения)	Линейная (> 99.6 %)
8	Поперечная когерентность	Полная
9	Временная когерентность	(40 ... 100) пс
10	Диаметр гауссова пучка на выходе метрологической станции	50 – 100 мм
11	Расходимость излучения	Дифракционная

В настоящей работе авторы оценили возможность измерения ЭПР простых и сложных объектов с использованием НЛСЭ. Простыми объектами являлись примитивы: куб с ребром 20 мм из алюминия, алюминиевый цилиндр диаметром и длиной по 20 мм и стальные шары диаметром 13 мм и 28 мм. Эти объекты использовались для калибровки экспериментальной установки. Схема эксперимента показана на рис. 4.

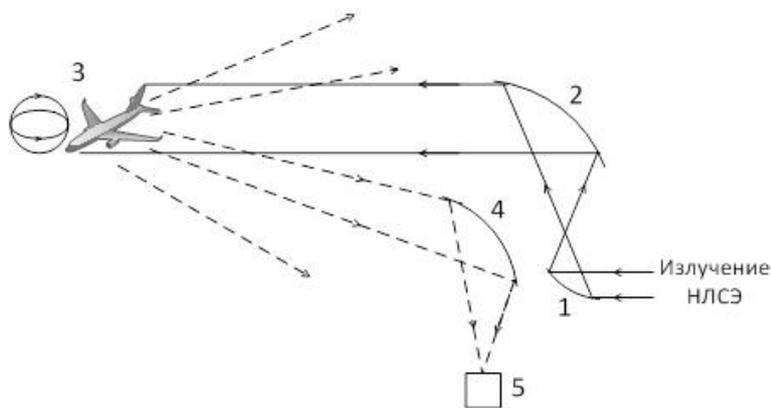


Рис. 4. Схема экспериментов: 1, 2 – параболические зеркала передающей антенны, 3 – объект на двумерном угловом сканере (поворотном стенде), 4 – приемная параболическая зеркальная антенна, 5 – детекторная система

Разработанную экспериментальную установку для измерения ЭПР можно рассматривать как аналог лоатора ТГц-диапазона [11]. Она состоит из излучателя, который включает канал вывода ТГц-излучения из ЛСЭ, выходное окно канала и ослабитель излучения; системы формирования пучка, включающей малое и большое параболическое зеркало (аналог передающей антенны лоатора); аналогом приемной антенны служит параболическое зеркало детектора. Система приема и обработки сигналов и информации состоит из пироэлектрического детектора, синхронного усилителя, высокочастотного цифрового осциллографа, АЦП, сопряженного с компьютером. В качестве системы контроля и управления служат модулятор излучения и контроллер шаговой подвижки. Объект размещается на измерительном стенде, включающем поворотный стенд с угловой шаговой подвижкой (рис. 4–6).

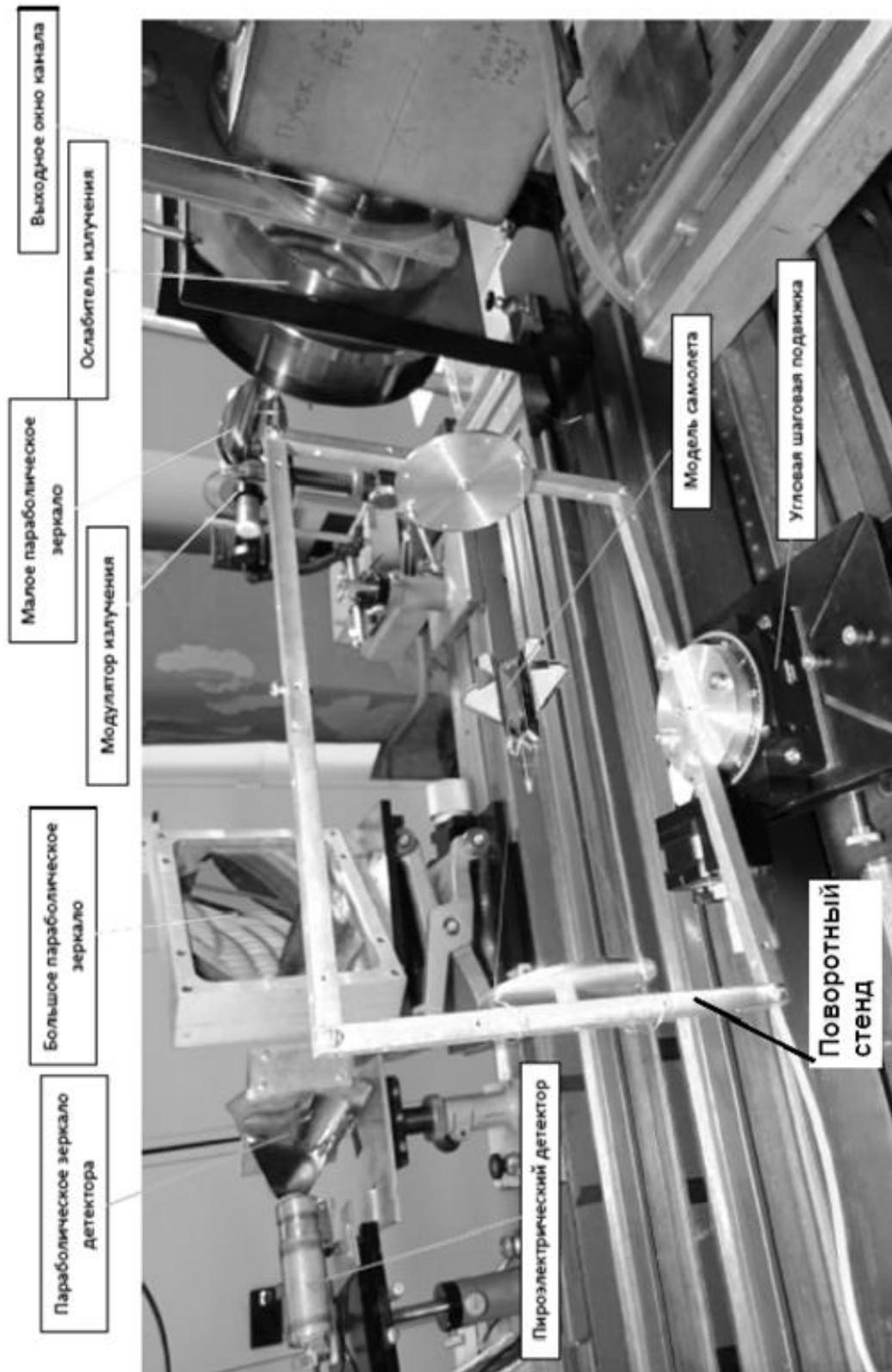


Рис. 5. Экспериментальная установка для измерения ЭПР моделей в терагерцовом диапазоне. Ракурс 1 – вид на излучатель

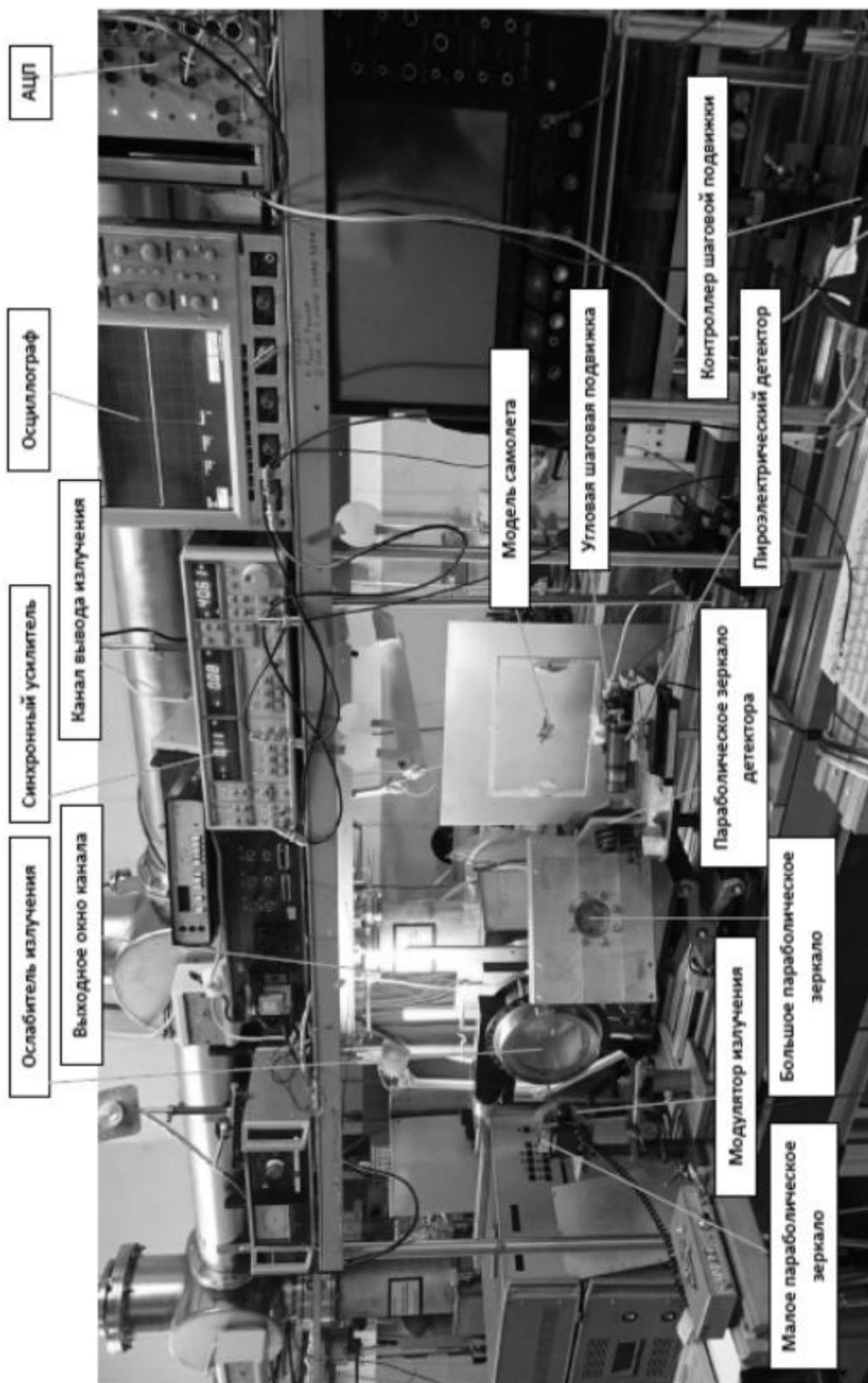


Рис. 6. Экспериментальная установка для измерения ЭПР моделей в терагерцовом диапазоне.  
 Ракурс 2 – вид на облучаемый объект со стороны рабочего места экспериментатора

В качестве более сложного объекта на поворотном стенде устанавливалась стилизованная (неточная) модель истребителя пятого поколения F-22 “Raptor” (США).

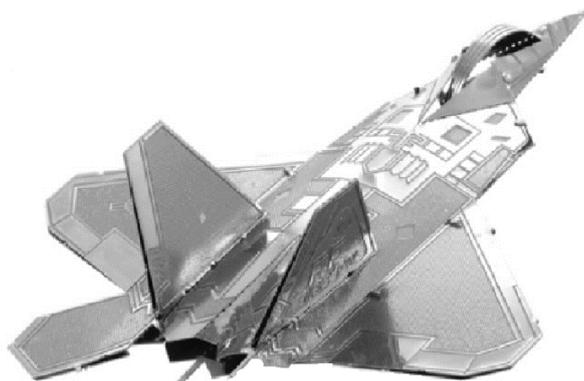


Рис. 7. Фото стилизованной 3D-модели самолета F-22 “Raptor”, масштаб 1:210, материал – нержавеющая сталь

### 3. Результаты измерения ЭПР моделей в терагерцовом диапазоне

Для проведения экспериментов по измерению ЭПР моделей были выбраны следующие параметры излучателя: длина волн  $\lambda = 0.13$  мм (2.308 ТГц). Импульсы с длительностью 80 пс, частота следования импульсов 5.6 МГц, импульсная мощность 200 кВт, средняя мощность 90 Вт.

Проверка работоспособности экспериментальной установки и ее калибровка проводились на простейших полированных алюминиевых объектах – примитивах: кубе и цилиндре, а также на стальных шарах двух диаметров. Измерялась угловая зависимость ЭПР примитивов. Как видно из экспериментальных графиков, в угловой зависимости интенсивности отраженного сигнала наблюдаются четкие пики, соответствующие зеркальному отражению (рис. 8), а в случае отражения от осесимметричного объекта угловая зависимость интенсивности отраженного сигнала отсутствует (рис. 9).

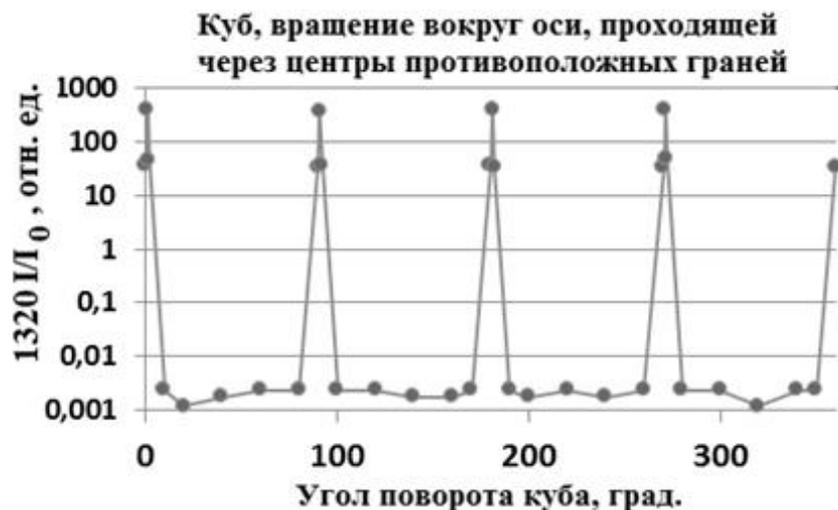


Рис. 8. Угловая зависимость относительной интенсивности ТГц-излучения при обратном рассеянии от вращающегося куба

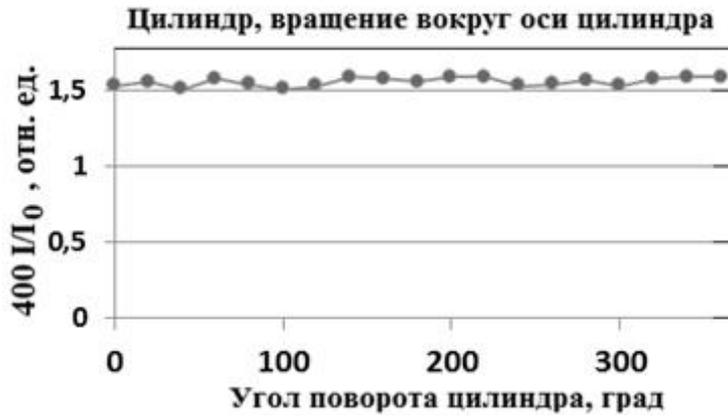


Рис. 9. Угловая зависимость относительной интенсивности ТГц-излучения при обратном рассеянии от боковой поверхности вращающегося цилиндра

В качестве сложного объекта выбрана стилизованная стальная модель истребителя 5-го поколения F-22 “Raptor”. Ее ЭПР определялась путем нормирования относительной интенсивности отраженного сигнала к интенсивности отраженного сигнала шара радиусом  $R_{ш} = 14$  мм. Поскольку ЭПР шара равна его поперечному сечению, в нашем случае  $RCS_{ш} = \pi R_{ш}^2 = 1.96 \text{ см}^2 = 2.92 \text{ дБсм}^2$ . В радиолокации, в связи с большим диапазоном изменения ЭПР, для ее характеристики часто применяется вместо ( $\text{м}^2$ ) единица измерения  $\text{дБм}^2$ . Их связь имеет вид:  $RCS, \text{дБм}^2 = 10 \lg(RCS, \text{м}^2)$ .

Результаты экспериментов по измерению ЭПР F-22 представлены на круговых диаграммах, где фоновым рисунком служит фотография F-22, поясняющая положение модели при эксперименте. Угол  $\theta$  – угол между направлением пучка и нормалью к нижней части фюзеляжа. В эксперименте объект закреплялся под углом  $\theta$  и далее на поворотном столе изменялся его азимутальный угол  $\phi$ , который и являлся аргументом круговой диаграммы.

Эксперименты проведены при углах  $\theta = 0^\circ, 45^\circ, 90^\circ$ , и  $315^\circ (-45^\circ)$ . Азимутальный угол изменялся через  $1^\circ$  (рис. 10–12). Максимальные пики на всех диаграммах соответствуют зеркальным отражениям от тех или иных плоских частей самолета, которые, как следовало ожидать, сильно увеличивают эффективную площадь рассеяния объекта в направлениях таких зеркальных отражений.

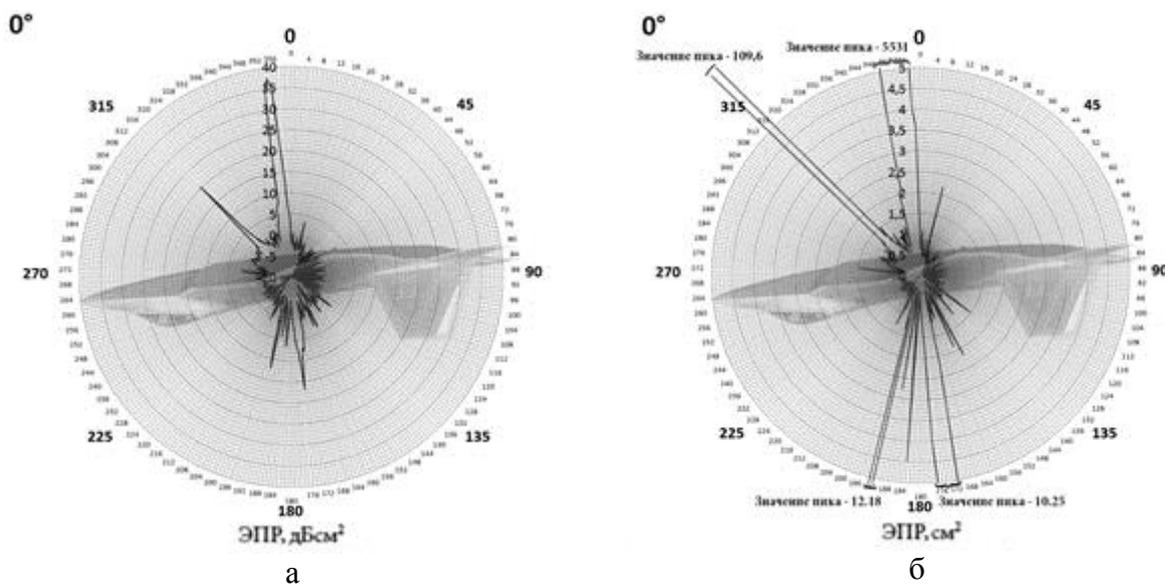


Рис. 10. ЭПР модели истребителя F-22 “Raptor” при  $\theta = 0^\circ$ ; б – увеличенный масштаб

На круговой диаграмме при  $\theta = 0^\circ$  (рис. 10) главный пик ( $\varphi = 353^\circ$ ) соответствует практически зеркальному отражению от нижней части фюзеляжа ЭПР = 340 дБсм<sup>2</sup>. В отличие от этого, отражение от верхней части фюзеляжа из-за насечки на крыльях не является зеркальным и соответствующий пик при  $\varphi = 176^\circ$  значительно ниже ЭПР = -6,1 дБсм<sup>2</sup>.

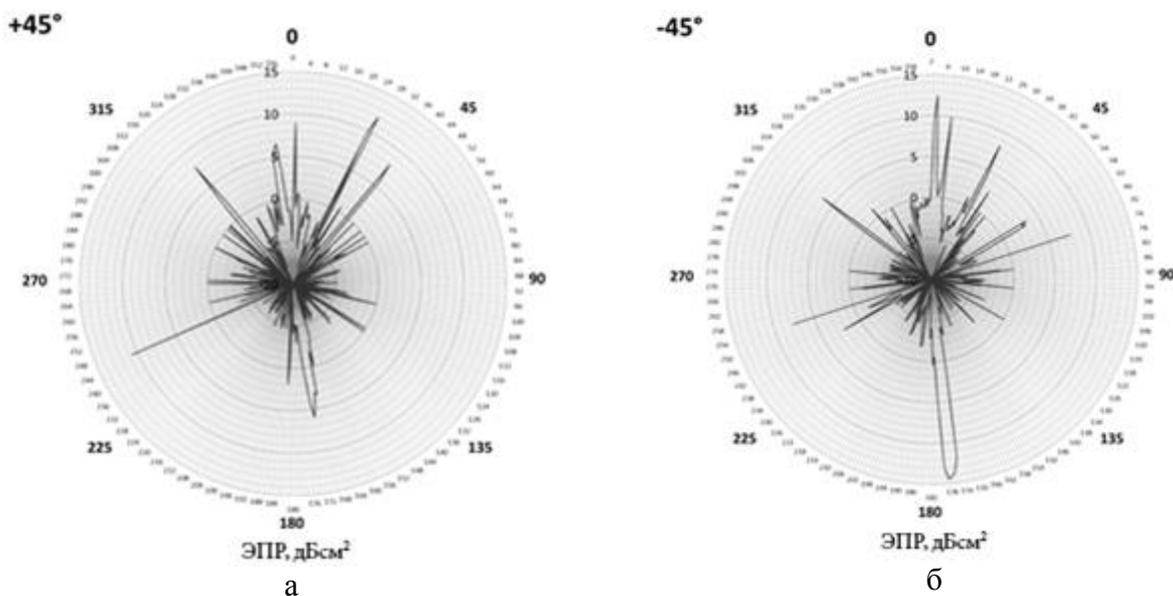


Рис. 11. ЭПР модели истребителя F-22 “Raptor”: а)  $\theta = +45^\circ$ , б)  $\theta = -45^\circ$

Пик при  $\theta = -45^\circ$ ,  $\varphi = 176^\circ$  соответствует отражению от верхней части фюзеляжа истребителя.

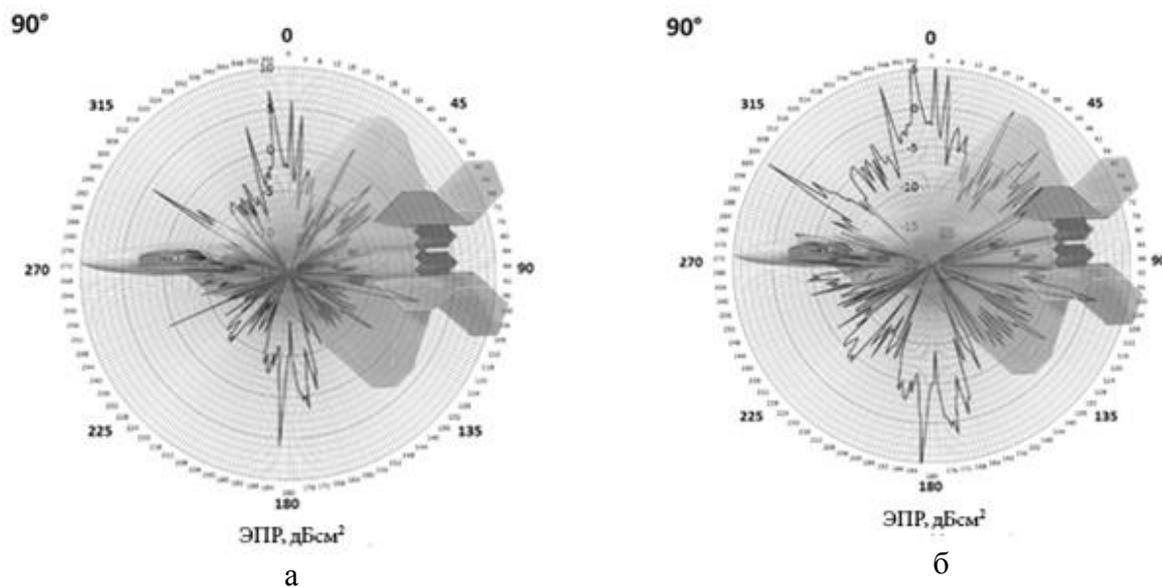


Рис. 12. ЭПР модели истребителя F-22 “Raptor” при  $\theta = 90^\circ$ ; б – увеличенный масштаб

При  $\theta = 90^\circ$  (рис. 12), когда модель облучается со стороны крыльев, наблюдается минимальное рассеяние. Здесь существенный вклад могут давать кили хвостового оперения модели, которые установлены почти вертикально, этому соответствуют небольшие пики на диаграмме при  $\varphi = 0^\circ$ ,  $180^\circ$  и  $360^\circ$ .

## 4. Обсуждение результатов

Эксперименты показали, что применение НЛСЭ как источника ТГц излучения при измерении ЭПР простых и сложных объектов должно быть весьма эффективным. В то же время эксперимент показал, что для работы в дальней зоне (зоне Фраунгофера) необходимо повышать чувствительность установки и снижать ее шумы, что возможно при использовании гелиевого детектора, который позволит измерять отраженный сигнал на расстоянии порядка 50 м. Поглощение терагерцевого излучения на водяных парах в воздухе в этих экспериментах можно уменьшить до приемлемого уровня, настраивая длину волны НЛСЭ в одно из многочисленных окон прозрачности атмосферы.

Для расширения номенклатуры моделей целесообразно увеличить диаметр пучка.

Заметим, что подобные измерения в дальней зоне возможны только с мощным излучением НЛСЭ. Кроме этого, плавная перестройка длины волны излучения лазера позволяет моделировать ЭПР на заданных частотах реальных ГГц-локаторов, используя одни и те же дорогостоящие точные модели реальных объектов.

## Литература

1. National Radar Cross Section Test Facility – AECOM [Электронный ресурс]. URL: <http://www.aecom.com/projects/national-radar-cross-section-test-facility/> (дата обращения: 10.10.2016).
2. The Center for Land Use Interpretation [Электронный ресурс]. URL: <http://clui.org/ludb/site/lockheeds-helendale-radar-cross-section-facility> (дата обращения: 10.10.2016).
3. RF Field Probe for F-35 RCS Measurement Facility - The Howland Company [Электронный ресурс]. URL: [http://thehowlandcompany.com/radar\\_stealth/RCS-Lockheed\\_F-35.htm](http://thehowlandcompany.com/radar_stealth/RCS-Lockheed_F-35.htm) (дата обращения: 10.10.2016).
4. *Alves M. A., Martins I. M., Miacchi M. A., Rezende M. C.* Radar Cross Section of Simple and Complex Targets in the C-band: A Comparison between Anechoic Chamber Measurements and Simulations // PIERs Online. 2008. V. 4, № 7. P. 791–794.
5. *Schroder A., Renker M., Aulenbacher U., Murk A., Boniger U., Oechslin R., Wellig P.* Numerical and experimental radar cross section analysis of the quadcopter DJI Phantom 2 // 2015 IEEE Radar Conference. 2015. P. 686–692.
6. *Michishita N., Dinh N., Yamada Y.* Simulation and Measurement Methods for RCS Estimations of a Scale Model Airplane // REV Journal on Electronics and Communications. 2016. V. 5, № 1–2. P. 151–158.
7. *Сколник Н. И.* Справочник по радиолокации: в 4 т, Москва, Советское Радио, 1976–1979, Т. 1. С. 356.
8. *Danylov A. A., Goyette T.M., Waldman J., et.al.* Terahertz inverse synthetic aperture radar (ISAR) imaging with a quantum cascade laser transmitter // OPTICS EXPRESS 2010. V. 18, № 15. P. 16264–16272.
9. *Iwaszczuk K.* Terahertz Technology for Defence and Security-Related Applications. Technical University of Denmark. August 2012. 172 p.
10. *Kulipanov G. N., Bagryanskaya E. G., Chesnokov E. N., Choporova Yu. Yu., Gerasimov V. V., Getmanov Ya. V., Kiselev S. L., Knyazev B. A., Kubarev V. V., Peltek S. E., Popik V. M., Salikova T. V., Scheglov M. A., Serebriakov S. S., Shevchenko O. A., Skrinisky A. N., Veber S. L., and Vinokurov N. A.* Novosibirsk free electron laser – facility description and recent experiments // IEEE Transaction on Terahertz Science and Technology. 2015. V. 5 (5). P. 798–809.

11. Черевко А. Г., Ильин Е. М., Полубехин А. И., Черевко А. А., Кубарев В. В. Патент RU 164965 U1, Терагерцовый радиолокатор, приоритет от 18.09.16. Опубликовано 27.09.2016 Бюл. № 27.

*Статья поступила в редакцию 10.05.2016*

**Черевко Александр Григорьевич**

к.ф.-м.н., профессор, заведующий кафедрой физики СибГУТИ (630102, Новосибирск, ул. Кирова, 86), тел. (383) 269-39-20, e-mail: cherevko@mail.ru.

**Кубарев Виталий Владимирович**

д.ф.-м.н., доцент, старший научный сотрудник института ядерной физики им. Г. И. Будкера СО РАН (630090, Новосибирск, просп. Академика Лаврентьева, 11), тел. (383) 329-49-90, e-mail: V.V.Kubarev@inp.nsk.su.

**Кулипанов Геннадий Николаевич**

д.ф.-м.н., академик, советник РАН института ядерной физики им. Г. И. Будкера СО РАН, директор Сибирского центра синхротронного и терагерцового излучения (630090, Новосибирск, просп. Академика Лаврентьева, 11), тел. (383) 329-44-98, e-mail: G.N.Kulipanov@inp.nsk.su.

**Ильин Евгений Михайлович**

д.ф.-м.н., профессор, ведущий аналитик инновационного технологического центра комплекса научной политики МГТУ им. Н. Э. Баумана (105005, Москва, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1), e-mail: evgil45@mail.ru.

**Полубехин Александр Иванович**

к.т.н., руководитель инновационного технологического центра комплекса научной политики МГТУ им. Н. Э. Баумана (105005, Москва, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1), тел. 8-925-821-06-31, e-mail: polub1980@mail.ru.

**Моргачев Юрий Вячеславович**

инженер лаборатории физических основ телекоммуникаций СибГУТИ (630102, Новосибирск, ул. Кирова, 86), e-mail: morgachev.yury@gmail.com.

**Terahertz wave scattering by objects of complex geometrical shape using Novosibirsk free electron laser**

**Alexander G. Cherevko, Vitaly V. Kubarev, Gennady N. Kulipanov, Evgeny M. Il'in, Alexander I. Polubehin, Yury V. Morgachev**

The feasibility of Novosibirsk free electron laser (NovoFEL) as a radiation source in a special installation designed for the measurement of radar cross-section (RCS) of scaled three-dimensional objects to obtain RSC of the objects in GHz frequency range is considered. Experimental radar cross-sections of various models are presented.

*Keywords:* free electron laser (FEL), radar cross-section (RCS), terahertz radiation.