

УДК 621.37.08

**В. В. Овсяников², В. М. Попель¹,
А. Л. Ольшевский¹, П. В. Попель²**

¹Державне конструкторське бюро «Південне» ім. М. К. Янгеля, Дніпропетровськ

²Дніпропетровський національний університет

**Компактный антенный полигон
для экспериментальной отработки
антенн космических аппаратов**

Надійшла до редакції 20.01.04

Наведено результати розрахунків характеристик нового компактного антенного полігону, який потрібен для експериментального відпрацювання і проведення випробувань антен діапазону надзвичайно високих частот. Методом хвильової оптики з урахуванням теорії дифракції Френеля визначено один з головних параметрів компактного антенного полігону — відстань між колімаційним дзеркалом і досліджуваною антеною.

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время одним из главных направлений совершенствования и развития космических систем является уменьшение габаритов и массы их элементов и соответствующего технологического оборудования при сохранении или улучшении их качественных характеристик.

Экспериментальная отработка и испытания антенных систем являются актуальной проблемой при оснащении ракетно-космической и авиационной техники радиоэлектронной аппаратурой. Эта проблема обусловлена необходимостью выполнения весьма точных антенных измерений параметров уникальных антенн. Значительные трудности возникают при высокоточных измерениях характеристик излучения антенн с большим коэффициентом направленного действия, особенно если требуется экономия времени и средств.

Известно, что окружающее антенну пространство принято делить на три области: реактивную, область излучаемого ближнего поля и дальнюю зону излучения. При этом окончательное формирование диаграммы направленности (ДН) любой антенны происходит в ее дальней зоне (зоне Фраунгофера). Для антенн с электрически большой апертурой

граница между зоной излучаемого ближнего поля и дальней зоной излучения определяется приблизительно из выражения [3]

$$R \geq (2D^2)/\lambda, \quad (1)$$

где D — наибольший размер апертуры антенны; λ — длина рабочей волны.

В соответствии с выражением (1) для антенн СВЧ-диапазона, имеющих апертуру порядка $D/\lambda \sim 100$ и более, расстояние от облучателя до дальней зоны, на котором необходимо размещать исследуемую антенну, составляет 200—2000 м. При таких расстояниях между облучателем и исследуемой антенной в условиях дорогостоящего загородного открытого антенного полигона все же возникают нежелательные отражения от земли и окружающих предметов, которые по мере увеличения расстояния R увеличиваются. Кроме того, воздействие внешних природных факторов, особенно в зимнее время, ограничивает возможности проведения измерений, приводя к дискомфорту обслуживающего персонала, потерям времени и удорожанию работ.

По этим причинам оказывается целесообразным определять характеристики излучения антенн в ближней зоне излучения при относительно небольших расстояниях между облучателем и исследуе-

мой антенной [2, 4—6] в компактном антенном полигоне (КАП) относительно небольших размеров. Для значительного уменьшения расстояния R испытываемая антенна облучается пространственно ограниченным (коллимированным) пучком электромагнитной энергии вблизи апертуры большой параболической (цилиндрической или линзовой) антенны, называемой по «оптической» аналогии коллиматором пучка. Наиболее широкое распространение в настоящее время получили прецизионные параболические антенны, создающие ограниченный пучок квазиплоской волны. При этом расстояние R между коллиматором и исследуемой антенной может быть уменьшено во много раз, и вся аппаратурная часть вместе с коллиматором может быть размещена в безэховой камере сравнительно небольших размеров.

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ОПТИМАЛЬНОГО РАССТОЯНИЯ МЕЖДУ КОЛЛИМАТОРОМ И ИСПЫТУЕМОЙ АНТЕННОЙ

Предварительная оценка показала, что для обеспечения измерений ДН остро- и слабонаправленных антенн сантиметрового диапазона длин волн размеры раскрыва коллиматора должны быть не менее пяти метров. Так как в этом случае размеры апертуры коллиматора существенно превышают длину рабочей волны, теория излучаемого пучка может рассматриваться в приближении волновой оптики [1]. Следует принять во внимание, что приближение волновой оптики не учитывает дифракционные явления на краях апертуры, приводящие в зоне дифракции Френеля к существенным осцилляциям амплитуды поля в пучке. В диапазоне расстояний от апертуры коллиматора, где эти осцилляции существенны, распределение амплитуды и фазы поля в поперечном сечении пучка может сильно отклоняться от распределения в плоской волне. Поэтому задача состоит в том, чтобы определить те максимальные расстояния от апертуры коллиматора до исследуемой антенны, где эти осцилляции еще незначительны и ими можно пренебречь. Кроме того, это расстояние ограничивается возникновением осцилляций поля в пучке, а также степенью расходимости (дефокусировки) пучка по мере распространения его от апертуры. В соответствии с теорией дифракции Френеля [8] степень этой дефокусировки увеличивается с увеличением расстояния от апертуры, осциллируя вокруг определенного среднего значения. Эти осцилляции прекращаются приблизительно на расстояниях $(2D^2)/\lambda$ (1), т. е. на расстояниях дальней зоны, где

амплитуда поля уже изменяется в соответствии с законом $1/R$ и происходит окончательное формирование главного лепестка ДН.

Введем в рассмотрение параметр дальней зоны $\Delta = \frac{R}{(2D^2)/\lambda}$, который при $\Delta = 1$ приводит к выражению (1), что соответствует дальней зоне.

Тогда с учетом теории дифракции Френеля [8] получим

$$E_\theta = -\frac{iZ_0 \cos\theta \cos\varphi}{\pi/4\Delta} e^{-\frac{i\pi}{4\Delta} \times} \times \left[L_1\left(\frac{\pi}{8\Delta}, U\right) + iL_2\left(\frac{\pi}{8\Delta}, U\right) \right], \quad (2)$$

где $Z_0 = \sqrt{\mu_0/\epsilon_0}$ — волновое сопротивление свободного пространства, L_1, L_2 — функции Ломмеля, $U = 0.5kD \cdot \sin\theta$, $k = 2\pi/\lambda$ — волновое число.

Рассмотрим, как изменится выражение (2) при переходе в дальнюю зону (т. е. при $\Delta \rightarrow 1$). Функции Ломмеля выражаются с помощью ряда по функциям Бесселя:

$$L_n(W, U) = \sum_{p=0}^{\infty} \frac{(-1)^p W^{n+2p} \cdot J_{n+2p}(U)}{U^{n+2p}}, \quad (3)$$

где $W = \frac{kD^2}{8R} = \frac{\pi}{8\Delta}$, I — действующее значение электрического тока на круглой апертуре.

В дальней зоне $\Delta \geq 1$, $W \leq \pi/8 \leq 0.39$, и достаточно взять первый член ряда:

$$L_1(W, U) = \frac{\pi}{8\Delta} \cdot \frac{J_1(U)}{U},$$

$$L_2(W, U) = \frac{\pi^2}{64\Delta} \cdot \frac{J_2(U)}{U^2} \approx 0.$$

Поэтому выражение для поля в дальней зоне будет иметь вид

$$E_\theta \approx -Z_0 \cos\theta \cos\varphi \cdot \frac{J_1(U)}{2U}. \quad (4)$$

Таким образом, получаем известную ДН равномерно возбужденной круглой апертуры типа $J_1(U)/(2U)$. Если бы рассматривалась равномерно возбужденная квадратная апертура, то ДН была бы типа $(\sin U)/U$. В этом случае в более точной формуле (2) вместо функций Ломмеля фигурировали бы интегралы Френеля

$$C(U) = \int_0^U \cos \frac{\pi t^2}{2} dt,$$

$$S(U) = \int_0^U \sin \frac{\pi t^2}{2} dt. \quad (5)$$

Именно осцилляции этих функций приводят к колебаниям поля на оси пучка. Огибающая осциллирующей затухает по мере приближения к апертуре, стремясь к определенному постоянному значению. В приближении Френеля осцилляции начинаются за границей зоны ближних реактивных полей.

Для примера приведем выражения для модуля плотности потока мощности Π на оси квадратной (сторона L) и круглой (радиус $D/2$) апертур [8]:

$$\Pi_{\text{кв}} = 16.4 \left[C^2 \left(\frac{1}{2\sqrt{\Delta}} \right) + S^2 \left(\frac{1}{2\sqrt{\Delta}} \right) \right]^2, \quad (6)$$

$$\Pi_{\text{кр}} = 26.1 \left[1 - \frac{16\Delta}{\pi} \sin \frac{\pi}{8\Delta} + \frac{128\Delta^2}{\pi^2} \left(1 - \cos \frac{\pi}{8\Delta} \right) \right]. \quad (7)$$

Очевидно, что зависимости $\Pi(\Delta)$ в обоих случаях (6) и (7) осциллируют, что является результатом дифракционного характера полей в зоне излучаемого ближнего поля.

По результатам исследований выражений (6) и (7) можно сделать вывод, что на малых расстояниях от апертуры осцилляции малы и считать значение $\Delta \leq 0.01$ ($R \leq 0.01 \cdot 2D^2/\lambda$) в качестве критерия максимального расстояния от апертуры коллиматора до испытываемой антенны. Что касается ограниченной по углу θ , то с учетом [8] можно отметить, что формула (2) справедлива при $\theta \leq 30^\circ$.

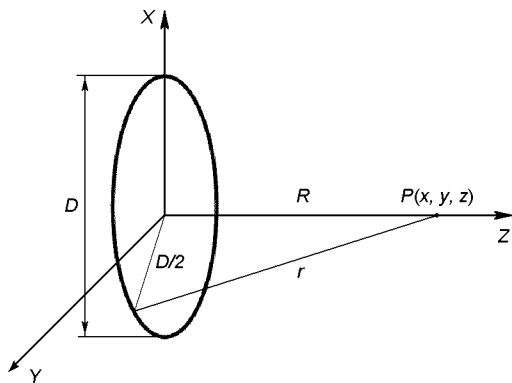


Рис. 1. Расположение круглой излучающей апертуры в декартовой системе координат

Найдем ограничение по расстоянию между апертурой и исследуемой антенной. С одной стороны, в соответствии с рис. 1 точная оптическая длина пути от края апертуры до точки наблюдения P есть

$$r_{\text{опт}} = \frac{2\pi}{\lambda} \left(R^2 + \frac{D^2}{4} \right)^{1/2}.$$

С другой стороны, в приближении Френеля это расстояние принимается равным

$$r_{\text{фр}} = \frac{2\pi}{\lambda} \left(R + \frac{D^2}{8R} \right).$$

Допуская, что разность хода лучей по этим двум расстояниям не превышает $\pi/8$, можно записать

$$\frac{2\pi}{\lambda} \left[\sqrt{R^2 + D^2/4} - \frac{2\pi}{\lambda} \left(R + \frac{D^2}{8R} \right) \right] = \frac{\pi}{8}. \quad (8)$$

Отсюда минимальное расстояние, допустимое в формуле (2), будет решением уравнения

$$R^3 - \frac{R^2\lambda}{32} + \frac{RD^2}{8} - \frac{D^4}{8\lambda} = 0,$$

решая которое, находим [8]

$$R \leq \frac{D}{2} \left(\frac{D}{\lambda} \right)^{1/3}. \quad (9)$$

Таким образом, из выражения (9) для случая $\lambda = 15$ см и $D = 5$ м, получим $R \leq 8$ м.

Отвлекаясь от приближения Френеля для рассматриваемого случая, применим приближение волновой оптики. Если считать, что на апертуре коллиматора имеется чисто линейная поляризация электромагнитного поля, то поле пучка будет также линейно поляризовано, и его можно представить функцией

$$E(x, y, z) = P_x U(x, y, z), \quad (10)$$

где P_x — постоянный единичный вектор поляризации. Вне апертуры функция $U(x, y, z)$, как известно, удовлетворяет однородному волновому уравнению [7]

$$\Delta U + k^2 U = 0. \quad (11)$$

По мере распространения от апертуры пучок излучаемого поля расширяется. Будем, как и в геометрической оптике, считать, что распределение энергии происходит вдоль лучей. Тогда решение уравнения (11) можно искать в виде $U = A(S)e^{-iks}$, где $A(S)$ — амплитуда поля пучка, S — длина вдоль пучка.

Общее решение волнового уравнения (10) будем искать в виде бесконечной суммы

$$U(r, z) = \sum_{n=0}^{\infty} A_n L_n \left(2 \frac{r^2}{W_0^2} \right) \exp \left(-\frac{r^2}{W_0^2} \right), \quad (12)$$

где L_n — полиномы Лаггера, W_0 — радиус раскрыва коллиматора. Чтобы ряд (12) сходилась, на функцию $U(r, 0)$ должны быть наложены определенные ограничения. Она должна быть кусочно-непрерыв-

ной, ограниченной на интервале $0 \dots \infty$ и удовлетворяющей условию, чтобы интеграл $\int_0^{\infty} U^2(r, 0) dy$ имел конечное значение. Отсюда следует, что равномерное распределение на апертуре ($U(r, 0) = 1$) не может быть разложено в ряд по полиномам Лагерра. Эту трудность можно преодолеть, если на апертуре задать равномерное распределение, но несколько спадающее к краям. Если задать распределение на апертуре в виде экспоненты, слабо спадающей к краям апертуры, т. е., $U(r, 0) = e^{-\alpha y}$, то для любых $\alpha > 0$ условие разложимости в ряд по полиномам Лагерра будет выполняться.

Расчеты распределения амплитуды и фазы поля в поперечном сечении пучка на различных расстояниях от апертуры были проведены на компьютере. При этом выбрано значение $\alpha = 0.025$, что обеспечивало спад амплитуды поля на краях апертуры менее чем на 0.5 дБ. Поперечные размеры апертуры коллиматора были выбраны равными 5 м. Вычисления полиномов Лагерра проводилось с использованием рекуррентной формулы

$$(n + 1)L_{n+1}(y) = (2n + 1 - y)L_n(y) - nL_{n-1}(y). \quad (13)$$

Для лучшей аппроксимации кривой принималась сумма относительно большого числа N членов ряда по полиномам Лагерра, то есть

$$e^{-0.025y} = \sum_{n=0}^N A_n L_n(y) e^{-y/2}, \quad (14)$$

$$y = 2 \frac{r^2}{W_0^2}.$$

Оценка точности (14) проводилась с использованием табличных значений $e^{-0.025y}$. Различие между табличными значениями и значениями, вычисленными по (14) при $N = 100$, имеется в четвертом-пятом знаке после запятой, то есть, абсолютная точность аппроксимации распределения на апертуре полиномами Лагерра равна 0.01 %.

Расчеты распределения амплитуды и фазы поля в поперечном сечении пучка на различных расстояниях от апертуры коллиматора проводились для расстояний $R = 3 \dots 7$ м и рабочих длин волн $\lambda = 2 \dots 15$ см. Они показали, что расходимость пучка на этих расстояниях чрезвычайно мала и очень медленно увеличивается по мере увеличения расстояния. Таким образом, максимально возможное расстояние от апертуры коллиматора до исследуемой антенны составляет 7—8 м, что соответствует полученным выше результатам с применением приближений Френеля в соответствии с формулами (6) и (7).

Оценим минимально возможное расстояние между апертурой коллиматора и испытуемой в КАП антенной. При этом следует принимать во внимание фактор, ограничивающий снизу расстояние от апертуры коллиматора до облучателя. Это нежелательная кроссполяризационная составляющая, которая определяется кривизной поверхности коллимационного зеркала и которая может быть уменьшена с увеличением фокусного расстояния коллиматора [1]. Поэтому при данной апертуре желательно иметь значительное фокусное расстояние, для чего использовать длиннофокусное зеркало с соотношением $f/D \geq 0.6$, где f — фокусное расстояние, а D — диаметр апертуры. Это означает, что в рассматриваемом случае фокусное расстояние должно быть $f \geq 3$ м, чем и ограничивается минимально возможное расстояние между коллимационным зеркалом и исследуемой антенной. Обычно коллимационное зеркало представляет собой вырезку из параболоида с вынесенным из вторичного поля облучателем (рис. 2).

Облучатель 1 должен быть расположен ниже исследуемой антенны 2, установленной на поворотном столе, чтобы не попадать в зону излучения коллимационного зеркала 3, а также не излучать в направлении испытуемой антенны. Поэтому уровень излучения облучателя 1 в направлении испытуемой антенны должен быть мал (≈ 50 —60 дБ), что практически достигается экранировкой облучателя поглощающим материалом.

Значительное влияние на структуру поля коллимированного пучка оказывает дифракция на краях зеркала коллиматора, приводя к появлению паразитного излучения, не совпадающего по фазе с излучением пучка коллиматора. Это паразитное,

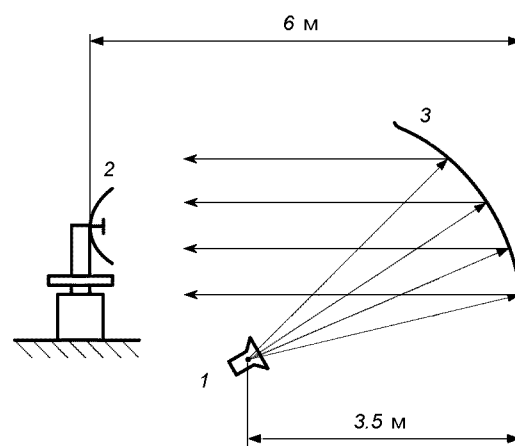


Рис. 2. Схема взаимного расположения исследуемой антенны 2, коллимационного зеркала 3 и облучателя 1 коллимационного зеркала 3

неколлимированное излучение можно уменьшить, если «закруглить» края зеркала коллиматора (см. рис. 2). Имеется еще один фактор, ограничивающий минимальное расстояние от плоскости апертуры коллиматора до исследуемой антенны. При малых расстояниях между коллиматором и испытуемой антенной возникают стоячие волны (эффект взаимодействия), что влечет за собой появление ошибок измерений. Для исключения этого явления испытуемая антенна должна «перехватывать» малую долю отраженной энергии и быть хорошо согласованной. Для этого она должна находиться на достаточном расстоянии от коллиматора, чтобы отраженная в результате дифракции электромагнитная волна была незначительной.

Таким образом, с учетом проведенных расчетов и оценок максимального и минимального расстояний между коллиматором 3 и исследуемой антенной 2 для рабочего частотного диапазона 2...15 ГГц предлагается обеспечивать в компактном антенном по-

лигоне расстояние между коллиматором 3 и облучателем 1 не менее 3 м, а расстояние между исследуемой антенной 2 и коллиматором 3 — не более 7—8 м.

С учетом приведенных выше оценок разработан компактный антенный полигон, структурная схема которого представлена на рис. 3.

Часть аппаратуры и оборудования компактного антенного полигона располагается в безэховой камере, покрытой изнутри поглощающим материалом, а часть в непосредственной близости от нее в нижней части компактного антенного полигона. На опорно-поворотном устройстве 1 закреплена исследуемая антенна 2 так, что ее положение можно корректировать с помощью позиционера 3 и механизма поворота исследуемой антенны 4. С противоположной стороны безэховой камеры напротив исследуемой антенны 2 смонтировано коллимационное зеркало 5, с внутренней стороны которого в его фокусе установлен облучатель 6 коллимационного

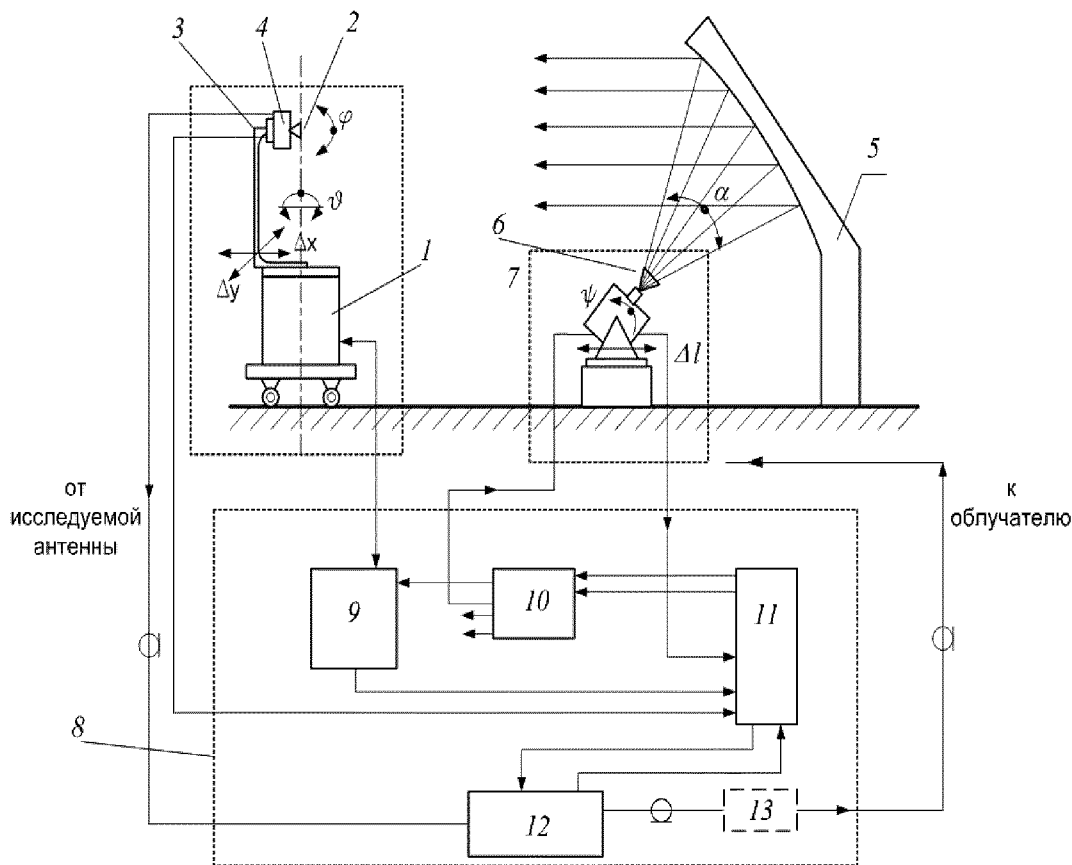


Рис. 3. Структурная схема компактного антенного полигона: 1 — опорно-поворотное устройство, 2 — исследуемая антенна, 3 — позиционер, 4 — механизм поворота исследуемой антенны, 5 — коллимационное зеркало, 6 — облучатель коллимационного зеркала, 7 — устройство поворота и перемещения облучателя, 8 — измерительно — управляющий комплекс, 9 — блок управления опорно-поворотным устройством, 10 — устройство управления, 11 — специализированная ЭВМ, 12 — измерительное устройство, 13 — усилитель СВЧ-мощности

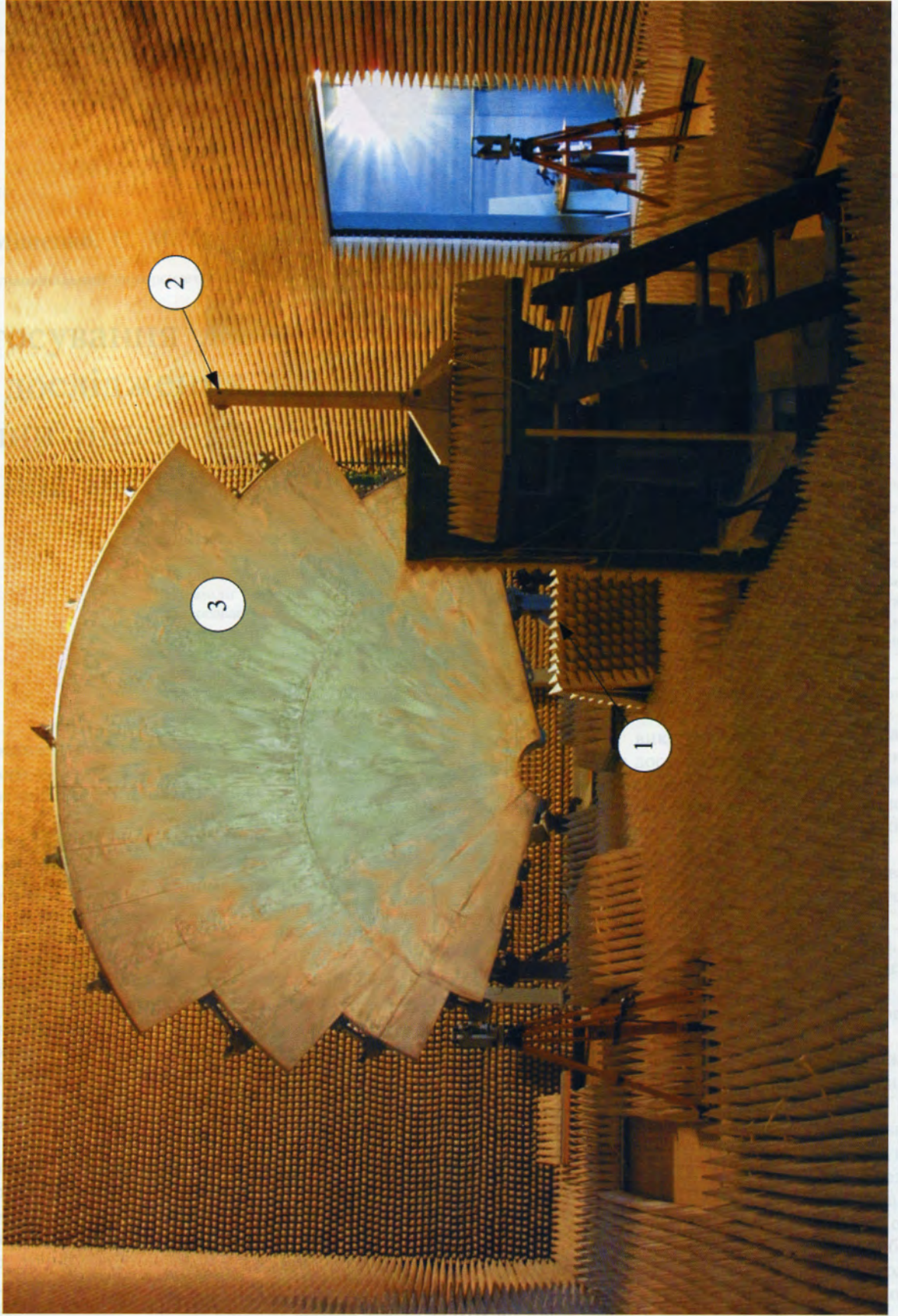


Рис. 4. Общий вид коллимационного стенда, предназначенного для антенных измерений в диапазоне СВЧ: 1 - облучатель коллимационного зеркала, 2 - испытываемая антенна, 3 - коллимационное зеркало

зеркала 5. С помощью устройства поворота и перемещения облучателя 6 последний можно разворачивать и перемещать, плавно изменяя меридиональный угол ψ или совершать возвратно-поступательные линейные перемещения Δl . Это позволяет корректировать положение облучателя 6 относительно фокуса коллимационного зеркала 5. Автоматизированное функционирование компактного антенного полигона обеспечивается с помощью измерительно-управляющего комплекса 8, который включает в себя блок управления опорно-поворотным устройством 9, устройство управления 10, специализированную ЭВМ 11, измерительное устройство 12 и усилитель СВЧ-мощности 13. Управляющие и измерительные органы компактного антенного полигона соединены между собой высоко- и низкочастотными экранированными кабелями.

В компактном антенном полигоне опорно-поворотное устройство исследуемой антенны 2, облучателя 6 и коллиматора 5 обеспечивают точность позиционирования не хуже $15'$. Аппаратные и программные средства измерительно-управляющего комплекса 8 являются уникальными как по архитектуре построения, так и по комплектации и исполнению.

Рассмотренный компактный антенный полигон находит применение для измерений параметров антенно-фидерных устройств (АФУ). При этом решаются следующие задачи:

- измерения ДН и других параметров различных антенно-фидерных устройств;
- исследование эффективной поверхности рассеяния аэрокосмических аппаратов;
- исследование фрагментов и узлов фазированных антенных решеток.

Энергетический потенциал измерительно-управляющего комплекса 8 совместно с используемым оборудованием комплексного антенного полигона составляет от 70 до 90 дБ при аппаратной погрешности измерений с помощью данного комплекса, не превышающей 1,8 дБ.

Общий вид коллимационного стенда предприятия Государственного конструкторского бюро «Южное» им. М. К. Янгеля, размещенного в безэховой камере представлен на рис 4. Приблизительно наружные размеры компактного антенного полигона составляют в длину 26 м при ширине и высоте 9×9 м. Такие размеры позволили разместить его внутри стандартного помещения цехового типа с отоплением, освещением и кондиционированием воздуха.

ВЫВОДЫ

Таким образом, разработанный и изготовленный в конструкторском бюро космических аппаратов и систем Государственного конструкторского бюро «Южное» им. М. К. Янгеля компактный антенный полигон является единственным в Украине уникальным сооружением, позволяющим производить точные антенные измерения, оценку электромагнитной совместимости радиосистем, оценку эффективной поверхности рассеяния аэрокосмических аппаратов и другие измерения при высокой степени имитации безэховости космического пространства.

Использование данного компактного антенного полигона для разнообразных измерений в диапазоне СВЧ позволяет повысить качество и культуру производства, ускорит выпуск новой техники и по многим показателям приведет к экономии затрачиваемых средств.

1. Вуд П. Анализ и проектирование зеркальных антенн: Пер. с англ. — М.: Радио и связь, 1984.—207 с.
2. Джонсон Р., Экер Х., Холлис Д. Определение диаграмм направленности антенн по результатам измерений в ближней зоне // ТИИЭР.—1973.—61, № 12.—С. 5—37.
3. Дабкин А. Л., Зузенко В. Л. Антенно-фидерные устройства. — М.: Сов. радио, 1961.—816 с.
4. Захарьев Л. Н., Леманский А. А., Турчин В. И. и др. Методы измерения характеристик антенн СВЧ / Под ред. Н. М. Цейтлина. — М.: Радио и связь, 1985.—368 с.
5. Кинбер Б. Е., Цейтлин В. Б. Об измерении параметров антенн в поле плоской волны, создаваемой коллиматором // Радиотехника и электроника.—1965.—10, № 7.—С. 1190—1201.
6. Куммер В. Х., Джилеспи Э. С. Антенные измерения // ТИИЭР.—1978.—66, № 4.—С. 143—173.
7. Марков Г. Т., Чаплин А. Ф. Возбуждение электромагнитных волн. — М.-Л.: Энергия, 1967.—376 с.
8. Сканирующие антенные системы СВЧ: Пер. с англ. / Под ред. Г. Т. Маркова, А. Ф. Чаплина. — М.: Сов. радио, 1966.—536 с.

THE COMPACT ANTENNA RANGE FOR EXPERIMENTAL IMPROVEMENT OF SPACE VEHICLES ANTENNAS

V. V. Ovsyanikov, V. M. Popel', A. L. Ol'shevskiy, P. V. Popel'

We present estimates for some characteristics of a new compact antenna range for the experimental improvement and performance of tests of antennas of microwave range. The method of wave optics in view of the theory of Frenel's diffraction was used to determine one of the main parameters of compact antenna measurement range, namely, the distance between a collimation mirror and tested antenna.