

# Оценка радиотехнических характеристик коллиматорных стендов для измерений антенн

Е. В. Коротецкий  
ООО «Радиолайн»  
ek@radiof.ru

**Аннотация.** В работе дана комплексная оценка производительности компактных полигонов, использующих радиоколлиматоры. Рассмотрено влияние кромок с зубцами и скруглениями рефлекторов коллиматорных стендов на амплитудно-фазовое распределение напряженности электрического поля в тихой зоне коллиматоров и на диаграммы направленности измеряемых на таких стендах антенн на примере модели антенной решетки. Показано, что коллиматор нужно подбирать под радиотехнические характеристики планируемых к измерениям объектов. Представлен практический подход для локализации источников рассеяния в безэховых камерах с коллиматорами. Описаны способы моделирования коллиматорных стендов при помощи компьютерных программ электромагнитных симуляций.

**Ключевые слова:** радиоколлиматор; компактный полигон; антенна; измерение; диаграмма направленности; тихая зона; эквивалентный уровень помех; спектр плоских волн

## I. ВВЕДЕНИЕ

Коллиматорные стенды предназначены для измерения параметров антенных устройств и эффективной поверхности рассеяния различных изделий. Интерес к таким измерительным стендам обусловлен их возможностью формировать плоский волновой фронт на небольших дистанциях, т. е. компактностью по сравнению с полигонами дальней зоны (Фраунгофера). В общем случае такой стенд состоит из офсетного зеркала (рефлектора) параболической формы и антенно-облучателя, установленной в его фокусе. Область плоского волнового фронта принято называть тихой зоной. В этой области на прецизионном опорно-поворотном устройстве устанавливается измеряемое изделие. Широко распространенным подходом [1] для оценки радиотехнических характеристик коллиматорных стендов является измерение на плоскости в центре тихой зоны сформированного амплитудно-фазового распределения напряженности электрического поля (АФР) на кополяризации и амплитудного распределения на кроссполяризации. Однако, с точки зрения полноты и достоверности результатов более универсальным является другой способ, предложенный в [2]. Авторы оценивают характеристики планируемых к измерениям на коллиматорном стенде изделий при помощи АФР, расположенного на сферической поверхности в пределах области тихой зоны. Используется представление напряженности поля в виде суперпозиции сферических волн [3]. Существенным минусом этого подхода является трудоемкость с точки зрения организации и проведения измерений АФР. В то время как измерения на плоскости легко реализуемы и требуют меньших трудозатрат. Оба подхода имеют общие недостатки. По

неравномерности АФР в тихой зоне нельзя сделать вывод о погрешностях измерения диаграмм направленности испытуемых изделий. Для устранения этого недостатка используется величина эквивалентного уровня помех. Кроме того, на этапе юстировки измерительного стенда по АФР невозможно определить направления на источники рассеяния волн, которые приводят к деградации поля в тихой зоне. В этом случае вычисляется спектр плоских волн.

В работе на примере фазированной антенной решетки (ФАР) с динамическим сканированием лучом показаны ошибки измерения амплитудных диаграмм направленности (ДН), возникающие при различных амплитудных распределениях в раскрыве ФАР и конфигурациях рефлектора коллиматорного стенда. Показана связь между эквивалентным уровнем помех и погрешностями измерения амплитудных ДН. На примере осветительных ламп в безэховой камере (БЭК) демонстрируется использование спектра плоских волн для определения источников помеховых сигналов.

## II. ГЕОМЕТРИИ РЕФЛЕКТОРОВ КОЛЛИМАТОРНЫХ СТЕНДОВ

Рассматриваем два вида рефлекторов, имеющих наибольшее распространение: с зубцами [1] и со скруглениями [4] на кромках. Моделирование будем проводить в X-диапазоне. Размер тихой зоны на нижней частоте рабочего диапазона 8.2 ГГц выберем  $20\lambda_{\max}$ . Габариты рефлекторов примем одинаковыми в виде квадрата со стороной  $40\lambda_{\max}$  с фокусным расстоянием  $F=70\lambda_{\max}$ . Размер параболической области рефлектора выберем по размеру тихой зоны. На практике параболическую вырезку для рефлектора с зубцами выбирают большего размера, чем параболическую область рефлектора со скруглениями. В работе габариты параболических зон выбраны одинаковыми для того, чтобы сравнить влияние двух способов минимизации рассеяния с кромок параболоида на результаты измерений. Моделирование проводилось в программе электромагнитных симуляций, использующей асимптотические приближения на основе геометрической оптики, геометрической и физической теорий дифракции. Моделирование АФР на плоскости в тихой зоне на расстоянии  $\frac{5}{3}F$  от рефлектора выполнялось с учетом засветки тихой зоны облучателем, как для наихудшего случая, если не указано обратное. На рис. 1 показаны результаты моделирования вертикального сечения тихой зоны на нижней частоте рабочего диапазона. Можно видеть, что у рефлектора с зубцами результат получился хуже. Неравномерность АФР составила 1.6 дБ по амплитуде и  $16^\circ$  по фазе, против 1 дБ и  $8^\circ$  у рефлектора со скруглениями. Выясним влияние этих неравномерностей на ДН ФАР, измеренную при помощи динамического сканирования лучом.

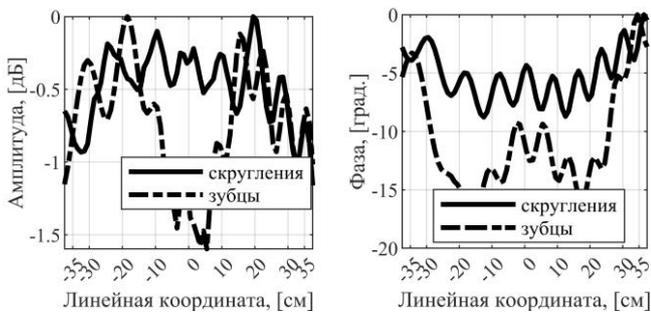


Рис. 1. Вертикальное сечение тихой зоны у рассматриваемых моделей рефлекторов коллиматоров на частоте 8.2 ГГц

### III. МОДЕЛИРОВАНИЕ ИЗМЕРЕНИЙ ФАР

Будем рассматривать плоскую квадратную ФАР со стороной  $12\lambda$ , шагом  $\lambda/2$  и изотропными излучателями при работе на передачу. ДН такой ФАР будет определяться множителем решетки [5]. Зададимся двумя наборами амплитуд возбуждения излучателей. Со спадающим распределением  $A_K(x_n, y_n)$ , используя окно Кайзера с коэффициентом  $\beta$  подобранном таким образом, чтобы уровень первых боковых лепестков был  $-30$  дБ. И с равномерным распределением амплитуд  $A_E(x_n, y_n)$ .

При динамическом сканировании (электронном переключении положения главного луча) раскрыв ФАР не изменяет своего положения в пространстве, а направление главного луча определяется изменением комплексных весов каждого канала решетки. В работе рассматривается именно динамическое сканирование, т.к. с точки зрения измерений ДН на коллиматорном стенде такой режим работы является наихудшим. Профиль раскрыва антенны имеет максимальный габарит и не меняется. При этом, при направлении главного луча на кромки рефлектора, образующиеся из-за рассеяния помеховые сигналы попадают в тихую зону и в весь раскрыв ФАР. В то время как при физическом повороте ФАР для измерения ДН в неподвижном положении луча, профиль раскрыва антенны, спроецированный на волновой фронт от рефлектора, уменьшается. При динамическом сканировании измеряемую на коллиматорном стенде ДН рассматриваемой ФАР в направлении обзора  $(u_0, v_0)$  можно представить как произведение множителя решетки на комплексное распределение напряженности электрического поля в тихой зоне в точках фазовых центров излучателей ФАР[6]:

$$F_K^E(u_0, v_0) = \frac{1}{\sqrt{N}} \sum_{n=1}^N (A_K^E(x_n, y_n) E_c(x_n, y_n) e^{jk(u x_n + v y_n)} e^{-jk(u_0 x_n + v_0 y_n)})$$

где:

$F_K^E$  – ДН в направлении обзора  $(u_0, v_0)$ , соответствующее направлению на рефлектор. Это направление остается неизменным в процессе измерения ДН ФАР с помощью динамического сканирования лучом. Индексы  $K$  и  $E$  обозначают используемую амплитудную подставку в каналах;  $N$  – количество каналов в ФАР;  $x_n, y_n$  – координаты  $n$ -го канала в раскрыве ФАР;  $E_c$  – комплексная поправка  $n$ -го канала на АФР в тихой зоне;  $k$  – волновое число;  $u, v$  – направляющие косинусы текущего отклонения главного луча ФАР.

Результаты моделирования измерений ДН в вертикальном сечении (худшем из-за засветки облучателем тихой зоны) для ФАР с низкими боковыми лепестками показаны на рис. 2 в сравнении с опорной идеальной ДН. Можно констатировать, что на обоих графиках измерения в секторе от плюс  $15^\circ$  и выше не удалась из-за сигнала облучателя, попавшего в тихую зону. В то же время, на коллиматоре со скруглениями рис. 2а удалось измерить первые боковые лепестки с максимальной ошибкой 1.5 дБ. На коллиматоре с зубцами рис. 2б получились грубые ошибки с искажением ширины главного лепестка и максимальной ошибкой измерения уровня первых боковых лепестков 4.6 дБ.

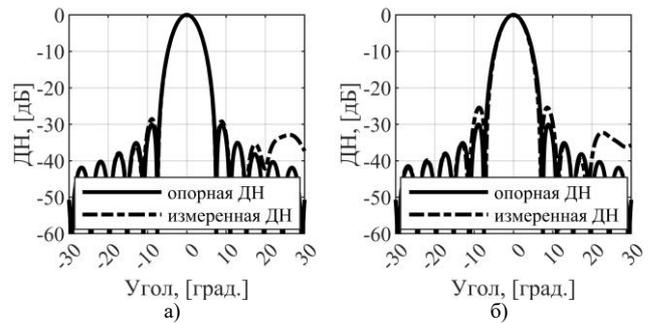


Рис. 2. Вертикальные сечения ДН ФАР со спадающим амплитудным распределением в каналах после симуляции измерений на рефлекторе со скруглениями а) и с зубцами б) на частоте 8.2 ГГц

Для того, чтобы наглядно отразить влияние рассматриваемых кромок рефлекторов на результаты моделирования измеренных ДН ФАР на рис. 3 показаны картограммы абсолютной разницы между измеренными и опорными амплитудными ДН в секторе  $\pm 30^\circ$  по углу  $\alpha$  и  $\pm 30^\circ$  по углу  $\epsilon$  (направляющие косинусы  $u = \sin \alpha, v = \sin \epsilon$ ), для которых построены вертикальные сечения рис. 2. Для простоты восприятия абсолютные значения несоответствий между нулями ДН на картограммах не показаны. В нижней части картограмм имеются обширные искажения ДН из-за засветки тихой зоны облучателем. В целом, по разнице амплитуды в боковых лепестках можно видеть, что рассеяние с зубцов происходит по всем направлениям, что приводит к фоновым искажениям всей ДН, в то время как рефлектор со скруглениями рассеивает излучение в стороны от тихой зоны, благодаря чему боковое излучение измеряемой антенны менее подвержено искажениям (области боковых лепестков светлее по сравнению с картограммой рефлектора с зубцами, рис. 3б).

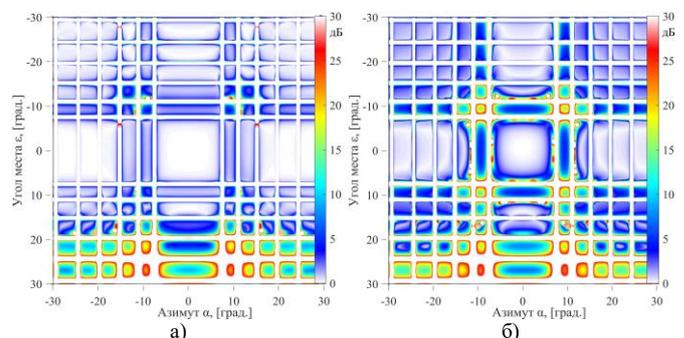


Рис. 3. Картограммы абсолютной разницы между измеренными и опорными амплитудными ДН после симуляции измерений на рефлекторе со скруглениями а) и с зубцами б) на частоте 8.2 ГГц

Интересно отметить, что первые два боковых лепестка ДН, измеренные на рефлекторе со скруглениями (сектор от 8° до 15° на рис. 3а) искажены существенно по сравнению с боковыми лепестками даже меньшей амплитуды из-за преломления на границе «алюминий-воздух», т.к. на 10°, при взгляде из плоскости измерений АФР в тихой зоне, находятся кромки рефлектора.

Результаты моделирования измерений ФАР с равномерным амплитудным распределением в каналах представлены на рис. 4. Можно видеть, что топология ДН совпадает с опорной в обоих случаях. Влияние сигнала от облучателя на ДН минимально из-за того, что его уровень меньше уровня боковых лепестков ФАР в рассматриваемом угловом секторе.

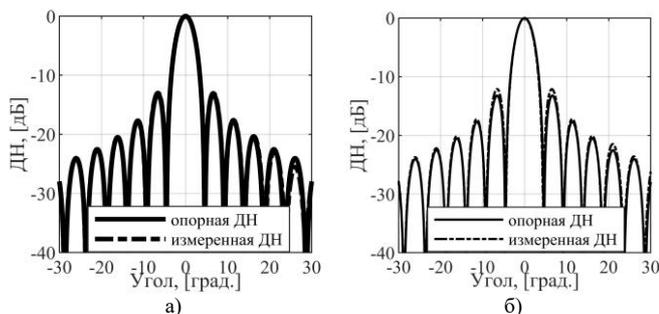


Рис. 4. Вертикальные сечения ДН ФАР со спадающим амплитудным распределением в каналах после симуляции измерений на рефлекторе со скруглениями а) и с зубцами б) на частоте 8.2 ГГц

#### IV. МОДЕЛИРОВАНИЕ ИЗМЕРЕНИЙ ПОЛЯ В ТИХОЙ ЗОНЕ ПРИ НАЛИЧИИ ИСТОЧНИКОВ ПОМЕХ

Негативное влияние на результаты измерений ДН оказывает не только плохое изолирование облучателя коллиматора от тихой зоны, как показано в разделе выше, но и отражения контрольного сигнала от элементов окружения в БЭК. Это могут быть неправильно изготовленные радиопоглощающие укрытия аппаратуры, отражения от металлических деталей опорно-поворотного устройства или оснастки. В случае, если результаты измерений АФР не совпадают с прогнозными, производится его постобработка с целью локализации источников рассеяния. Затем в программе электромагнитных симуляций выполняется более подробное моделирование коллиматорного стенда для подтверждения предполагаемых объектов влияния, полученных на этапе постобработки.

Используется два подхода для моделирования измерений поля в тихой зоне, упрощенный и подробный. В первом случае рассчитывается напряженность поля для набора интересующих точек в пространстве. При этом перемещение антенны-зонда и её ДН не учитываются. Этот подход применяется для базового моделирования АФР в тихой зоне, а также при наличии стационарных удаленных источников рассеяния. Во втором случае рассчитывается комплексный коэффициент передачи между антенной-зондом и антенной-облучателем. Моделирование выполняется с учетом перемещения антенны-зонда и её ДН, как при измерениях. При таком подходе становится возможным учет влияния окружения зонда, в том числе источников рассеяния, перемещающихся вместе с ним. В обоих случаях направленные свойства антенн задаются в виде предварительно рассчитанных распределений электромагнитного поля в ближней зоне (field source).

В работе моделирование измерений поля в тихой зоне при наличии помех показано на примере осветительных ламп, которые часто являются источниками рассеяния в отечественных беззловых камерах (наряду с датчиками дыма). Дело в том, что в России БЭК имеют статус производственных помещений, на них накладываются нормы по освещенности. Из-за этого изготовители БЭК часто вынуждены вешать потолочные осветительные лампы ниже уровня кромок поглощающего материала. Проведено моделирование коллиматорного стенда с рефлектором со скругленными кромками из раздела 2 и четырех светодиодных ламп размерами 140x100x30 мм каждая. В качестве макета лампы использована усеченная призма без основания из материала PEC (идеальный электрический проводник). Расположение и наклон ламп соответствовали монтажу в реальном БЭК. Моделирование проводилось в упрощенном виде в соответствии с описанием выше на частоте 8.2 ГГц. Результаты моделирования без учета засветки тихой зоны облучателем для случаев наличия и отсутствия ламп показаны на рис. 5. Можно видеть, что данные лампы при выбранных точках подвеса приводят к деградации АФР в тихой зоне. В ней имеется интерференция отраженных от нескольких ламп волн. Девиация амплитуды относительно огибающей без ламп составила 0.2 дБ, фазы – 2° (на рисунке нет). Ниже будет показано, как производится поиск источников рассеяния по измеренному на этапе юстировки АФР, а также как оценить влияние неравномерности АФР на погрешности измерений ДН.

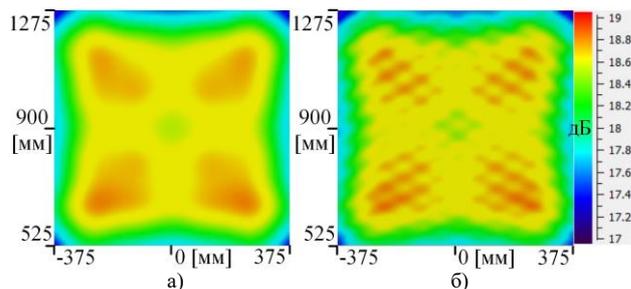


Рис. 5. Амплитудное распределение в центре тихой зоны коллиматора на плоскости в случае отсутствия а) и наличия б) ламп, свисающих с потолка БЭК

#### V. АНАЛИЗ РЕЗУЛЬТАТОВ ИЗМЕРЕНИЙ

В разделах 2 и 4 представлены результаты моделирования измерений АФР на плоскости в центре тихой зоны коллиматорных стендов. В случае получения неудовлетворительных или неожиданных значений в измеренных данных необходимо понять, где расположен потенциальный источник рассеяния. Конечно, если полученный результат не связан с геометрией рефлектора коллиматорного стенда как на рис. 1. Для определения углового направления на источник помехового сигнала используется расчет спектра плоских волн (PWS, plane wave spectrum) из измеренного АФР [7]:

$$PWS(k_x) = \int_{x=0}^L W(x)E(x)e^{jk_x x} dx, \quad \alpha = \arcsin\left(\frac{k_x}{k}\right). \quad (1)$$

где:  $k_x$  – проекция волнового вектора на текущее сечение АФР;  $\alpha$  – угол наблюдения;  $L$  – длина измеренного сечения АФР;  $E(x)$  – комплексное измеренное сечение АФР;  $W(x)$  – оконная функция. В качестве оконной функции используем окно Кайзера с  $\beta=6$ .

На рис. 6а на одном графике показаны рассчитанные PWS для модельного вертикального сечения АФР рефлектора со скруглениями из раздела 2 и для реального измеренного вертикального сечения такого же коллиматорного стенда. Можно видеть, что PWS получились схожими. Т. е. результат моделирования АФР описанным в разделе 4 способом в целом сходится с измеренным АФР. На рис. 6б на одном графике показаны PWS для горизонтального сечения АФР в тихой зоне БЭК, рассмотренного в разделе 4. Т. е. при моделировании без осветительных ламп и с ними. Легко видеть, что результаты отличаются.

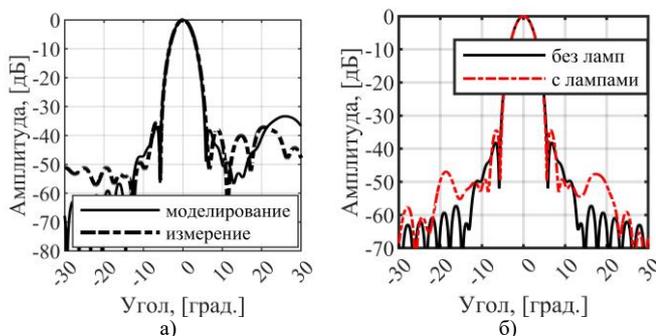


Рис. 6. Спектры плоских волн (PWS) для рассматриваемого рефлектора коллиматора со скруглениями в вертикальном а) и горизонтальном б) сечениях

Теперь, используя зависимость амплитуды сигнала от угла его прихода в тихую зону (PWS), можно соотнести её с объектами, имеющимися в БЭК. Так, на графиках рис. 6а в угловом направлении 22° из центра сечения тихой зоны виден максимум сигнала от облучателя, т. к. моделирование намеренно проводилось с учетом засветки тихой зоны облучателем, а при измерениях он был слабо изолирован от тихой зоны. На рис. 6б, где изображен PWS с учетом ламп, видны локальные увеличения сигнала на 10 дБ в районе 19° симметрично нуля градусов. Именно в этих угловых направлениях располагаются осветительные лампы дальнего ряда, находящиеся рядом с рефлектором. По уровню сигналов в нормированных PWS качественно оценивается, будут ли влиять на измеряемые ДН и в каких угловых направлениях источники рассеяния. Например, как мы убедились в разделе 3 после моделирования измерений ДН, засветка тихой зоны облучателем на уровне -30 дБ не позволяет измерить боковые лепестки ниже этого значения в секторе от плюс 15° и дальше, что соответствует рассчитанному PWS на рис. 6а. В то же время, помеховые сигналы от ламп с уровнем -47 дБ в узком угловом секторе очевидно не будут отказывать такое же негативное влияние на измеряемую ДН как облучатель.

В разделе 3 промоделировано измерение ДН ФАР с помощью динамического сканирования лучом. В этом случае расчет ДН ФАР с использованием АФР в тихой зоне позволяет качественно оценивать ошибки измерения ДН. Однако проводить подобного рода расчеты для каждой измеряемой антенны трудоемко и не всегда возможно, кроме того, с метрологической точки зрения интерес представляют погрешности измерений ДН. Из представленных ДН ФАР для двух различных амплитудных подставок в каналах можно сделать вывод, что один и тот же коллиматорный стенд может быть подходящим или не подходит для измерений ДН антенн в зависимости от того, какой уровень боковых лепестков и с какой погрешностью интересуется пользователь. Это значит, что ориентироваться только на неравномерность

АФР в тихой зоне недостаточно при выборе коллиматорного стенда. Нужно учитывать погрешность коллиматора при измерениях самого низкого уровня интересующих боковых лепестков ДН исследуемого изделия. Для вычисления такой погрешности можно использовать величину эквивалентного уровня помех (ESS, equivalent stray signal) [8]:

$$ESS / \max. = 20 \lg(10^{0.05 \cdot \Delta_{об}} - 1),$$

где:

$\Delta_{об}$  – разница между амплитудами опорной и измеренной ДН, в дБ. Исходными данными для «опорной» ДН в данном случае является плоское равномерное АФР, умноженное на оконную функцию. А для «измеренной» ДН – промоделированное или измеренное АФР в тихой зоне, умноженное на оконную функцию. Расчет опорной и измеренной ДН происходит аналогично вычислению PWS по (1), а в качестве оконной функции используется либо равномерное амплитудное распределение, либо амплитудное распределение косинус на пьедестале. Выбор конкретного вида этой оконной функции лежит на сертифицирующей коллиматорный стенд организации. В «Радиолайн» при расчетах используется равномерное распределение;  $\max.$  – максимум ДН. ESS нормируется к максимуму главного луча.

Удобно использовать два варианта ESS: для углового направления максимума помехового сигнала и его среднее квадратичное значение (RMS) в интересующей области углов (как правило, это передняя полусфера). Тогда погрешность в направлении максимума эквивалентной помехи или во всей области углов по интересующему уровню ДН с доверительной вероятностью 95 % можно вычислить как:

$$\Delta_{об} = 20 \lg(1 + 10^{0.05 \cdot (ESS - SL)}), \quad (2)$$

где:  $ESS$  – эквивалентный уровень помех либо в направлении максимальной помехи, либо его RMS во всей области углов, в дБ. Для получения доверительной вероятности 95 % нужно к RMS ESS прибавить 6 дБ ( $2\sigma$ );  $SL$  – интересующий уровень ДН, в дБ.

Рассчитанные по (2) погрешности амплитудных ДН ФАР в рассматриваемом угловом секторе по уровням -30 дБ и -13 дБ вместе с получившимися максимальными ошибками первых боковых лепестков представлены в табл. 1.

ТАБЛИЦА 1. ПОГРЕШНОСТИ И ОШИБКИ ИЗМЕРЕНИЯ ДН ПРИ РАЗНЫХ АМП. РАСПР. В КАНАЛАХ ФАР

|            | Погрешность в секторе углов |                 | Макс. ошибка измерения первых боковых лепестков |                 |
|------------|-----------------------------|-----------------|---|-----------------|
|            | Распр. «1»                  | Распр. «Кайзер» | Распр. «1»                                      | Распр. «Кайзер» |
| Уровень ДН | -13 дБ                      | -30 дБ          | -13 дБ  | -30 дБ          |
| Зубцы      | ±0.5 дБ                     | ±3.2 дБ         | 1.1 дБ  | 4.6 дБ          |
| Скругления | ±0.3 дБ                     | ±2.0 дБ         | 0.2 дБ  | 1.5 дБ          |

Из табл. 1 можно сделать вывод, что в рассчитанные погрешности измерений уровней ДН укладываются полученные в разделе 3 значения ошибок измерения первых боковых лепестков ДН ФАР при работе на рефлекторах с разной геометрией кромок и наличии засветки тихой зоны облучателем.

## VI. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе представлен способ учета АФР в тихой зоне коллиматорного стенда для расчета ошибок измерения ДН ФАР с динамическим сканированием лучом. Акцентируется внимание на разнице результатов измерений при использовании рефлекторов с зубцами и скруглениями кромок. При одних и тех же габаритах вырезки из параболоида и внешнего габарита рефлектора, скругленные кромки демонстрируют лучшую производительность по сравнению с зубцами. Показан практический подход для вычисления оценок погрешностей измерений на коллиматорных стендах амплитудных ДН по заданному уровню на основе вычисления эквивалентного уровня помех. Представлен способ локализации источников рассеяния при юстировке коллиматорных стендов с использованием вычисления спектра плоских волн. В работе показано, что коллиматор следует подбирать под радиотехнические характеристики планируемых к измерениям объектов, а не только по значениям неравномерности поля в тихой зоне. Описаны возможности по моделированию коллиматорных стендов в современных программах электромагнитных симуляций.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- [1] Балабуха Н.П., Зубов А.С., Солосин В.С. Компактные полигоны для измерения характеристик рассеяния объектов. М.: Наука, 2007. 51 с.
- [2] Parini C.G., Dubrovka R., Gregson S.F. CATR quiet zone modelling and the prediction of "measured" radiation pattern errors // AMTA. 2015.
- [3] Hansen J.E. Spherical near-field antenna measurements. London: IET, 2008. 48 p.
- [4] Gupta I.J., Erickson K.P., Burnside W.D. A method to design blended rolled edges for compact range reflectors // IEEE Transactions on Antennas and Propagation. 1990. V. 38. № 6. P. 853–861.
- [5] Скобелев С.П. Фазированные антенные решетки с секторными парциальными диаграммами направленности. М.: Физматлит, 2010.
- [6] Teh-Hong Lee, Burnside W.D. Compact range reflector edge treatment impact on antenna and scattering measurements // IEEE Transactions on Antennas and Propagation. 1997. V. 45. № 1. P. 57–65.
- [7] Liu X., Quan S. Spatial and angular domain simulation of the feed spillover in compact antenna test range // 9th International Symposium on Antennas, Propagation and EM Theory (ISAPE). IEEE. 2010. P. 159–162.
- [8] Newell A.C., Hindman G.E. Antenna pattern comparison using pattern subtraction and statistical analysis // EuCAP. 2011.