

## Результаты моделирования многолучевых диаграмм направленности и эффективности ESMT в фокусе Кассегрена в диапазоне 1–3 мм

© Г. А. Макоев, В. Б. Хайкин

СПбФ САО РАН, г. Санкт-Петербург, Россия

### Реферат

Новые одиночные миллиметровые/субмиллиметровые телескопы сегодня очень востребованы в Евразии, так же как и их включение в миллиметровую/субмиллиметровую РСДБ. Цель данной работы — получение многолучевых диаграмм направленности ESMT в диапазоне 2–3 мм и оценка абберационных потерь эффективности ESMT в диапазоне 1–3 мм для схемы Кассегрена без использования третичной оптики. Это позволит оценить возможности использования малоформатных матриц в фокусе Кассегрена ESMT для антенных измерений и калибровочных наблюдений, включая моментальные наблюдения большей части диска Луны, а также для спектральных наблюдений протяженных галактических объектов и активных областей Солнца.

Методом прямого интегрирования апертурного поля были рассчитаны одиночные и многолучевые диаграммы направленности ESMT из фокуса Кассегрена на волне 3 мм и 2 мм для плоской матрицы  $9 \times 9$  приемников (первичных облучателей), что близко к допустимому пределу. Различными методами также рассчитаны абберационные потери эффективности ESMT в диапазоне 1–3 мм для матричного режима работы из вторичного фокуса. Показано, что наиболее существенной абберацией в фокусе Кассегрена в поле зрения  $15' \times 15'$  и более является кривизна поля изображения. Приведены результаты моделирования диаграммы направленности, фазовой ошибки в раскрыве, ожидаемых абберационных потерь эффективности по Рузе и Шилу в сравнении с телескопом ALMA и антенной ММА.

**Ключевые слова:** субмиллиметровый телескоп, многолучевая диаграмма направленности, абберационные потери эффективности, поле зрения, матричный режим работы

*Контакты для связи: Макоев Герман Аланович (germanmakoev@gmail.com).*

**Для цитирования:** Макоев Г. А., Хайкин В. Б. Результаты моделирования многолучевых диаграмм направленности и эффективности ESMT в фокусе Кассегрена в диапазоне 1–3 мм // Труды ИПА РАН. 2023. Вып. 65. С. 29–41.

<https://doi.org/10.32876/AplAstron.65.29-41>

## Modeling Results of Multibeam Radiation Patterns and Efficiency of ESMT in Cassegrain Focus in the Range of 1–3 mm

G. A. Makoev, V. B. Khaikin

Saint Petersburg Branch of Special Astrophysical Observatory of the Russian Academy of Sciences,  
Saint Petersburg, Russia

### Abstract

New single mm/sub-mm telescopes are in high demand in Eurasia today, as is their inclusion in the mm/sub-mm VLBI. The purpose of this work is to obtain multipath radiation patterns of ESMT in the range of 2–3 mm and to estimate the aberration losses of ESMT efficiency in the range of 1–3 mm for the Cassegrain scheme without the use of tertiary optics. This will make it possible to evaluate the possibilities of using small-format arrays in the ESMT Cassegrain focus for antennal measurements and calibration observations, including instantaneous observations of most of the Moon's disk, as well as for spectral observations of extended galactic objects and active regions of the Sun.

By direct integration of the aperture field, single and multibeam ESMT RP were calculated from the Cassegrain focus on a wave of 3 mm and 2 mm for a flat matrix of  $9 \times 9$  receivers (horns), which is close to the permissible limit. By various methods, we also calculated the aberration efficiency losses of ESMT in the range of 1–3 mm for the matrix mode of operation from the secondary focus. It is shown that the most significant aberration in the focus of Cassegrain in the field of view  $15' \times 15'$  or more is the curvature of the image field (CIF). The results of modeling and calculations of RP, phase error in disclosure, and the expected aberration efficiency losses according to Ruze and Shillue in comparison with the ALMA telescope and the MMA antenna are given.

**Keywords:** submillimeter telescope, multi-beam radiation pattern, aberration loss of efficiency, field of view, matrix mode of operation

*Contacts: German A. Makoev (germanmakoev@gmail.com).*

**For citation:** Makoev G. A., Khaikin V. B. Modeling results of multibeam radiation patterns and efficiency of ESMT in Cassegrain focus in the range of 1–3 mm // Transactions of IAA RAS. 2023. Vol. 65. P. 29–41. <https://doi.org/10.32876/ApplAstron.65.29-41>

## Введение

Научные задачи для крупного миллиметрового/субмиллиметрового радиотелескопа, каким является телескоп 20-метрового класса, включают изучение звездообразования во Вселенной, поиск новых химических соединений, включая органические молекулы в космосе, поиск первичных (космологических) молекул в ранней Вселенной, исследование эффекта Сюняева-Зельдовича в скоплениях галактик, поляризацию и спектральные искажения реликтового излучения после рекомбинации и до эпохи реионизации («Темные века») (Khaikin et al., 2020). Новые одиночные телескопы миллиметрового/субмиллиметрового диапазона сегодня очень востребованы в Евразии, так же как и их включение в сеть VLBI Event Horizon Telescope (ЕНТ/ТГС) для исследования сверхмассивных черных дыр, расположенных в центре нашей и ближайших галактик (Akiyama et al., 2022).

В концепции проекта Eurasian subMM Telescopes (ESMT) (Khaikin et al., 2020; Хайкин и др., 2022) обосновано строительство трех новых высокоэффективных радиотелескопов миллиметрового/субмиллиметрового диапазона класса 15–21 м в Узбекистане на горе Ақташтау (3282 м) выше плато Суффа (2400 м), в России (выше 3000 м над уровнем моря) и на Тибетском плато в КНР (выше 5000 м над уровнем моря). Оптимальные диапазоны работы ESMT в РФ и Узбекистане 100–350 ГГц, на Тибете — 100–1500 ГГц, практически достижимое и эффективно заполненное поле зрения ESMT составит  $10' \times 10'$ . В настоящее время изучается астроклимат возможных мест размещения ESMT (Khaikin et al., 2022, Shikovtsev et al., 2022).

В концепции проекта ESMT было предложено взять за основу конструкцию европейских антенн ALMA (Marchiori et al., 2020), увеличить диаметр антенны до максимально возможного без принципиальных изменений конструкции ферменного каркаса, дополнить ее «активной поверхностью» и третичной оптикой, в т. ч. адаптивной. Механическое и тепловое моделирование, выполненное специалистами EIE Group, показало, что 12-метровая антенна ALMA без существенных изменений конструкции телескопа может быть увеличена только до 15 м. Для антенны диаметром 21 м для уменьшения потерь от астигматизма требуется изменение оптической схемы, ферменного каркаса, панелей и приемной кабины (Marchiori et al., 2020). Один из предложенных в работе подходов к оптимизации оптической схемы состоит в сохранении увеличения антенной системы ALMA  $M = 20$ , регулировании конических констант и положения контр-рефлектора, второй — в увеличении  $M$  и раз-

мещении третичной оптики на платформе Нэсмита. Наконец, третий подход состоит в размещении третичной оптики на платформе Нэсмита при меньшем увеличении антенной системы Кассегрена  $M$ , что уменьшит габариты третичной оптики, упростит оптическое согласование полей изображения с размерами приемной матрицы и коррекцию полевых aberrаций (Хайкин и др., 2022).

Для заполнения поля зрения  $10' \times 10'$  предложено применить многоволновые (многоцветные) KID-матрицы (на базе детекторов кинетической индуктивности) предельной чувствительности с числом пикселей  $10^4$  (Duan, Li et al., 2020; Duan, Khaikin et al., 2020). Выполненное оптическое моделирование показало, что с третичной оптикой в составе двух / трех асферических зеркал достижимо число Штреля 0.6 / 0.9 на волне 0.86 мм на краю поля зрения  $10' \times 10'$  (Хайкин и др., 2022). Коэффициент увеличения антенной системы с третичной оптикой  $M = 3$  является оптимальным для согласования поля изображения с максимальным физическим размером KID-матрицы  $150 \times 150$  мм и снижения в нем aberrаций, включая астигматизм и кривизну поля изображения (КПИ). Это дает дифракционное изображение точечного источника, расположенного в дальней зоне телескопа с радиусом диска Эйри  $r = 3.1$  мм на длине волны 0.86 мм (Хайкин и др., 2022). Для волн короче 0.86 мм с целью оптического согласования поля изображения с физическим размером матрицы, исправления КПИ, коматической, астигматизма и других видов aberrаций предложено применить более сложную оптическую систему с двумя асферическими зеркалами и корректирующей линзой из полимерного материала (полиметилпентен, ZEONEX и т. п.) или монокристаллического высокоомного кремния с полимерным просветляющим покрытием (Хайкин и др., 2022).

Цель данной работы — получение многолучевых диаграмм направленности (ДН) ESMT в диапазоне 2–3 мм и оценка aberrационных потерь эффективности ESMT в диапазоне 1–3 мм для схемы Кассегрена без использования третичной оптики. Это позволит оценить возможности использования малоформатных матриц в фокусе Кассегрена ESMT для антенных измерений и калибровочных наблюдений, включая моментальные наблюдения большей части диска Луны, а также для спектральных наблюдений протяженных галактических объектов и активных областей Солнца. Ранее похожие расчеты многолучевых ДН в миллиметровом диапазоне волн для рефлекторной параболической антенны и крупного рефлекторного радиотелескопа сделаны в работах

(Majorova, Khaikin, 2005; Khaikin, Lebedev, 2006). Аберрационные потери эффективности можно оценить как методами, взятыми из оптики (Padman, 1995), так и методами, предложенными Рузе для оценки эффективности двухзеркальных рефлекторных антенн (Ruze, 1966).

### Расчет многолучевых ДН и достижимое поле зрения ESMT из вторичного фокуса

На рис. 1 приведены результаты кусочно-элементного моделирования (КЭМ) и лучевого трассирования 21-метровой антенны ESMT, построенной по схеме Кассегрена с  $M = 20$  и достижимым полем зрения  $14'$  (Marchiori et al., 2020). При этом возникает значительная кривизна поля изображения (КПИ), что практически требует искривления приемной матрицы по поверхности Петсваля, и размер поля изображения на порядок превышает достижимые размеры приемной KID-матрицы. Для сравнения на рис. 2 приведена оптическая схема в составе двух асферических зеркал с полем зрения  $8' \times 8'$  и полем изображения  $150 \times 150$  мм

(Хайкин и др., 2022). Как будет показано ниже, при  $M = 12.5$  поле зрения  $10'–15'$  достижимо из вторичного фокуса схемы Кассегрена при аберрационных потерях менее 5% на волне 2–3 мм, включая КПИ. Однако заполнить соответствующее ему поле изображения во вторичном фокусе с помощью одной широкоформатной KID-матрицы невозможно из-за значительных размеров поля изображения в сравнении с достижимым сегодня размером широкоформатных KID-матриц (Duan, Khaikin et al., 2020). Мозаичное матричное решение без оптического согласования также не будет эффективным, поскольку приведет к избыточно высокой дискретизации (oversampling) и стоимости приемной системы на единицу поля зрения. Мозаичное решение может эффективно применяться для достижения широкого поля зрения  $\sim 0.5–1^\circ$ , но это требует многозеркальной оптической схемы согласования с размерами третичных зеркал  $\sim 2$  м, что ведет к значительному удорожанию проекта (Woody et al., 2012).

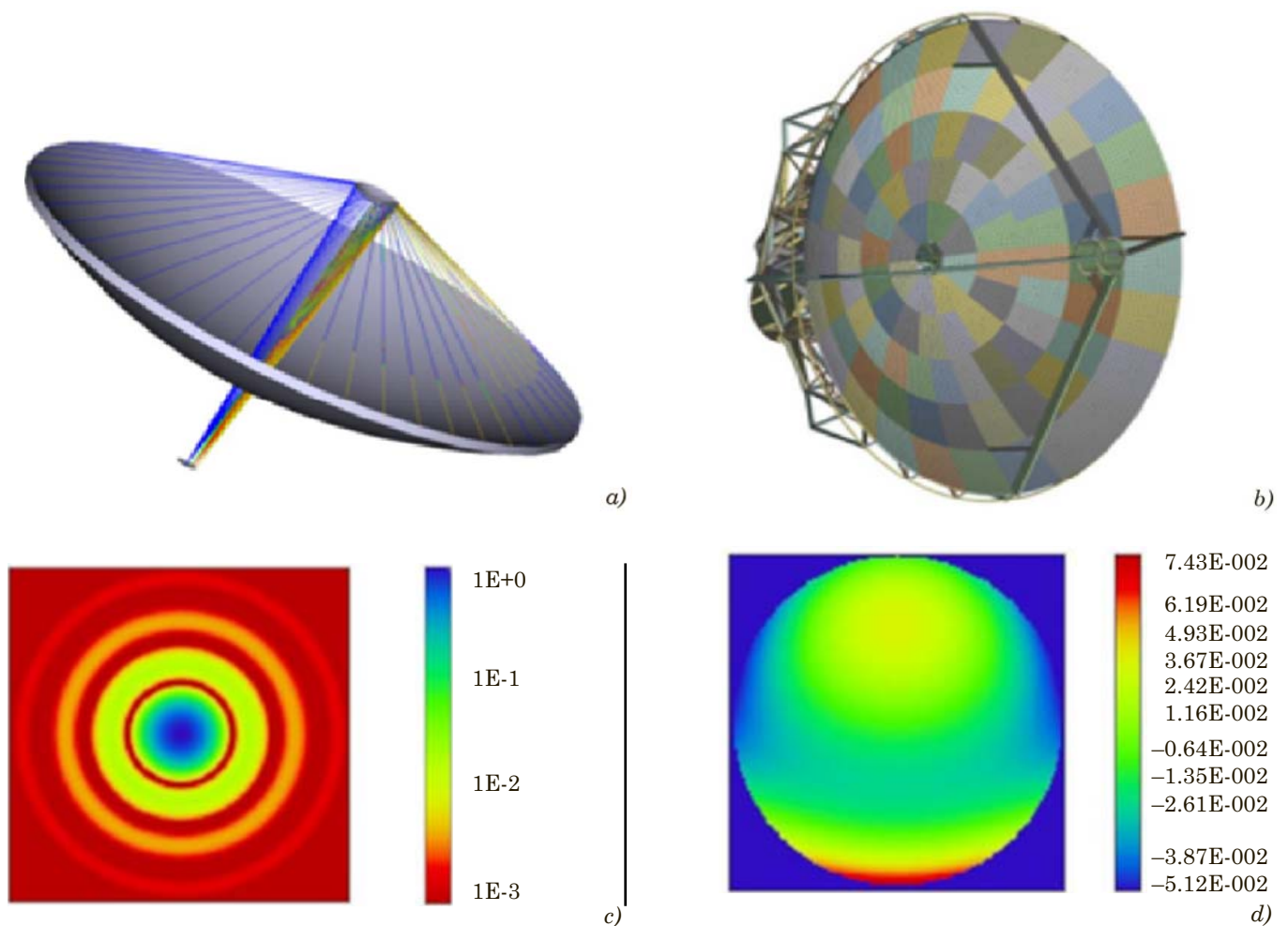


Рис. 1. Оптическая схема 21-метровой антенны ESMT — *a*; кусочно-элементное моделирование — *b*; функция рассеяния точки на оси (on-axis PSF) — *c*; размер изображения  $12.8 \times 12.8$  мм, функция волнового фронта в поле зрения  $\pm 7'$  (WFF) — *d*, RMS = 24 мкм,  $\lambda = 200$  мкм, увеличение антенны Кассегрена  $M = 20$ , выходной размер поля изображения  $1.573E + 003$  мм (Marchiori et al., 2020)

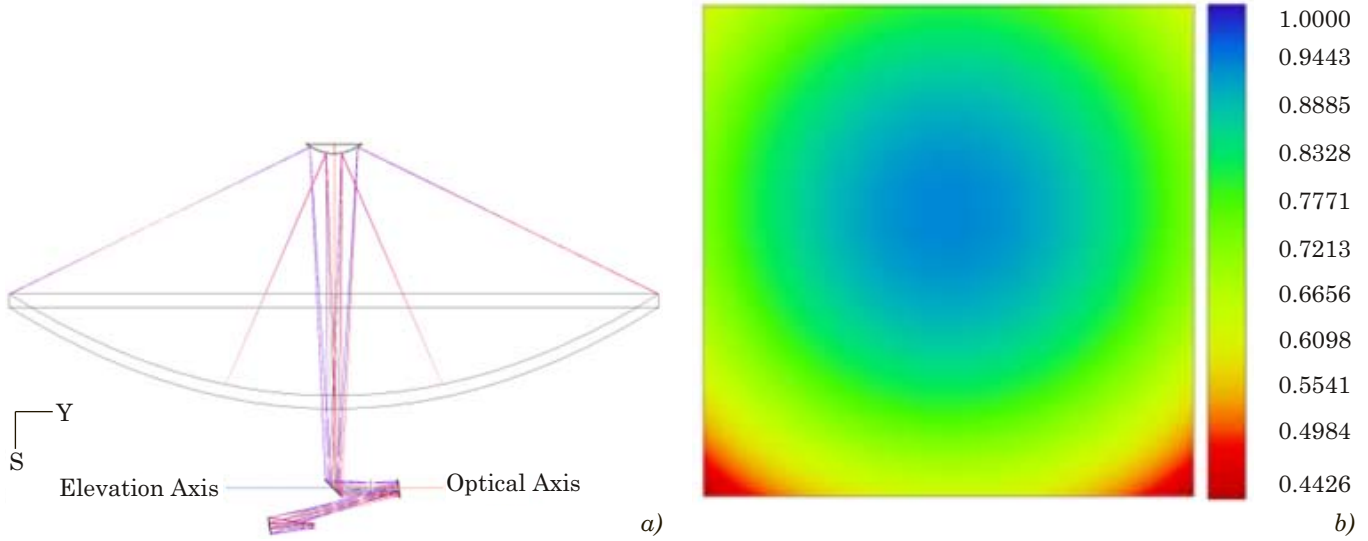


Рис. 2. Оптическая схема ESMT (21 м) с третичной оптикой в составе одного плоского и двух асферических зеркал на платформе Нэсмита — *a*, поле зрения ESMT 8' × 8' — *b*, число Штреля max/min = 0.93/0.44 на длине волны 860 мкм, поле изображения 150 × 150 мм, M = 3 (Хайкин и др., 2022)

Ниже будет рассмотрена возможность применения во вторичном фокусе Кассегрена плоских волноводных приемных матриц, что представляет интерес для ряда специальных инструментальных и астрофизических задач.

Для оценки достижимого поля зрения на длине волны 1–3 мм выполним расчет многолучевых ДН и оценим абберационные потери эффективности при выносе облучателя из фокуса.

ДН ESMT получим с помощью метода прямого интегрирования апертурного поля (IAF), ранее описанного в (Majorova, Khaikin, 2005; Khaikin, Lebedev, 2006). Ниже приведена уточненная формула для расчета ДН с выносом из фокуса методом IAF:

$$F(\theta, \delta) = \int_0^{2\pi} \int_0^{R_0} E(R/R_0) e^{jkR \sin \theta \cos(\delta - \varphi) + jk\Phi} R dR d\varphi,$$

где  $E(R/R_0)$  — нормированное поле на апертуре:

$$E(R/R_0) = \cos^2(a_1 \times R/R_0),$$

$$a_1 = a \cos(\sqrt{0.3}),$$

$E = 0$  при  $R = [0:0.9]$  — в области тени контррефлектора ( $d = 1.8$  м).  $k[m^{-1}] = 2\pi/\lambda$ ,

$$\Phi = \rho_{cm} - \rho,$$

$$\rho_{cm} =$$

$$= \sqrt{(R \cos \phi - \Delta x)^2 + R^2 \sin^2 \phi + (f - R^2/4f + \Delta y)^2},$$

$$\rho = \sqrt{R^2 + (f - R^2/4f)^2}$$

где  $f$  — фокусное расстояние параболоида (эквивалентное фокусное расстояние в двухзеркальной антенной системе),  $\theta, \delta$  — сферические координаты.

Угол, стягиваемый контррефлектором оптимального размера в системе Кассегрена, равен (Lamb, 2001):

$$\theta_s = 4A \tan\left(\frac{D}{4f}\right),$$

где  $f$  — эквивалентное фокусное расстояние системы Кассегрена с увеличением M. Для  $D = 21$  м,  $M = 12.5$ ,  $\theta_s = 11.44^\circ$ . Такую ДН по уровню 10 дБ можно получить на волне 3 мм / 2 мм с помощью оптимального конического рупора с внешним диаметром 39 мм / 25 мм.

С помощью быстрого алгоритма двумерного численного интегрирования, реализованного в среде Matlab, были построены трехмерные и двумерные многолучевые ДН ESMT в поле зрения до 30' × 30', которому при  $M = 12.5$  соответствует размер поля изображения в фокусе Кассегрена ~900 × 900 мм. Все полевые абберации в этом случае несущественны кроме КПИ. С потерями апертурной эффективности от КПИ ( $\leq 5\%$ ) в фокусе Кассегрена можно разместить плоскую приемную матрицу 9 × 9 элементов в волноводном исполнении. Для плотно упакованной (плотной) матрицы на волне 3 мм / 2 мм возьмем шаг 39 мм / 25 мм и разнос крайних элементов 316 мм / 200 мм, для неплотно упакованной (редкой) матрицы возьмем шаг 60 мм / 40 мм и разнос 480 мм / 320 мм.

На рис. 3 представлено модельное распределение амплитуды поля в раскрытие ESMT с контррефлектором и рассчитанная ДН на длине волны 3 мм. На рис. 4 показаны рассчитанные одиночные осевые и внеосевые ДН на волне 3 мм и 2 мм, на рис. 5 — многолучевые ДН в декартовых координатах для матрицы 9 × 9 элементов в фокусе



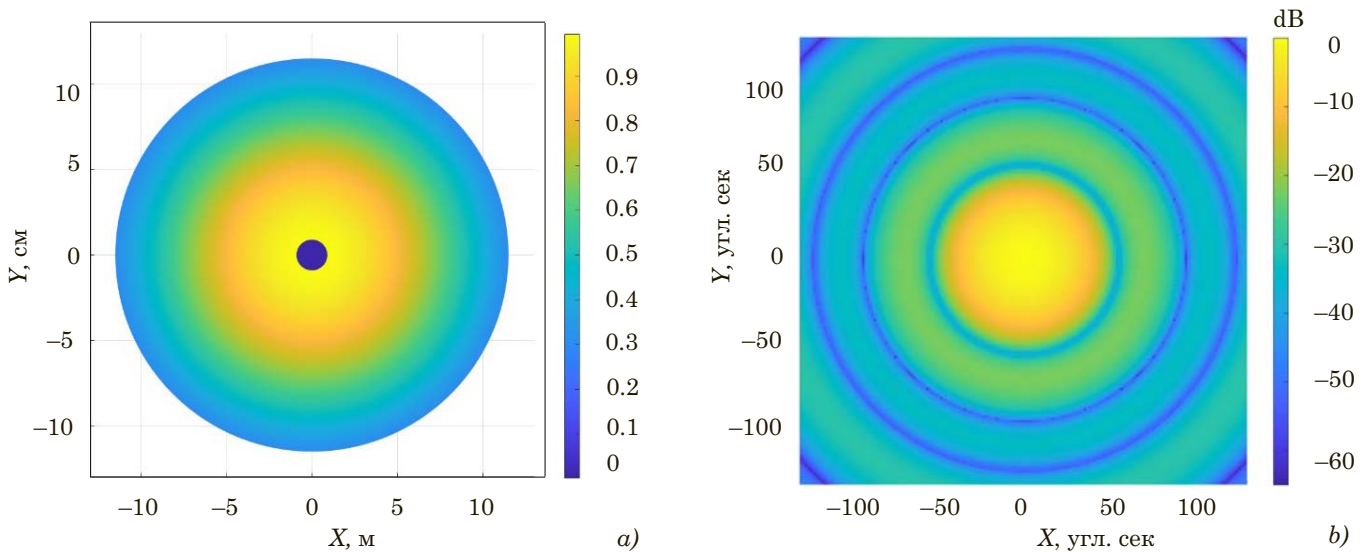


Рис. 3. Распределение амплитуды поля в раскрыве ESMT — *a*, двумерная осевая ДН ESMT на волне 3 мм — *b*

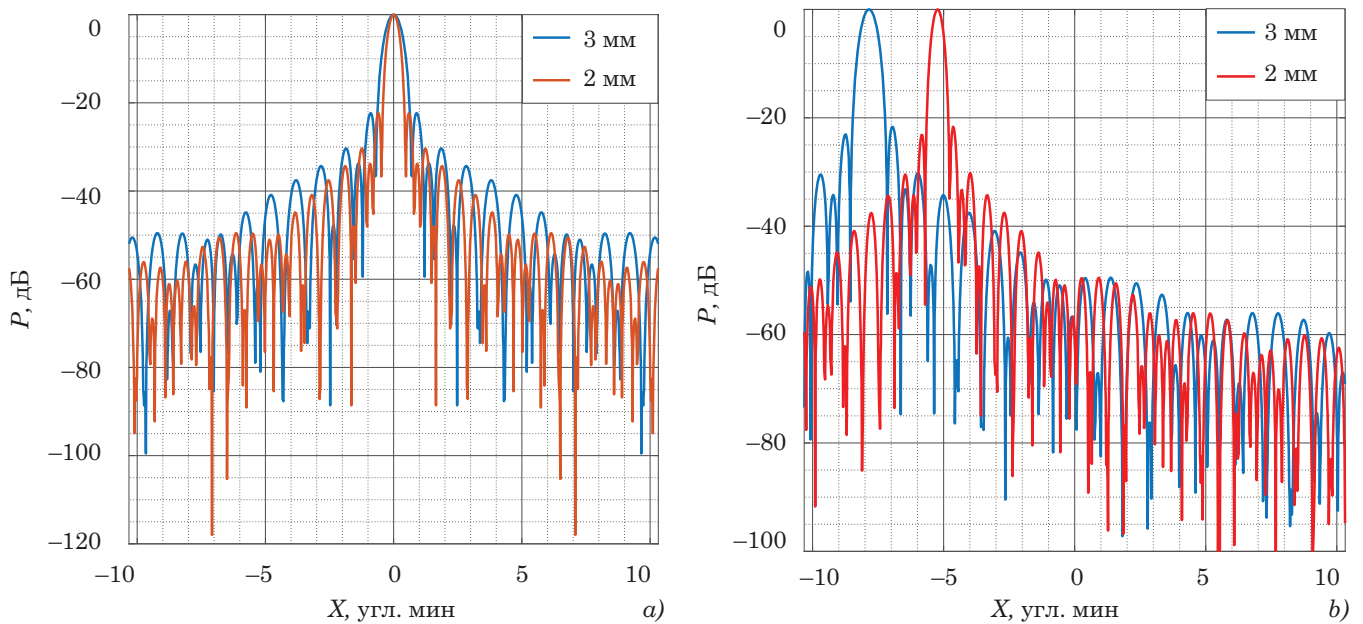
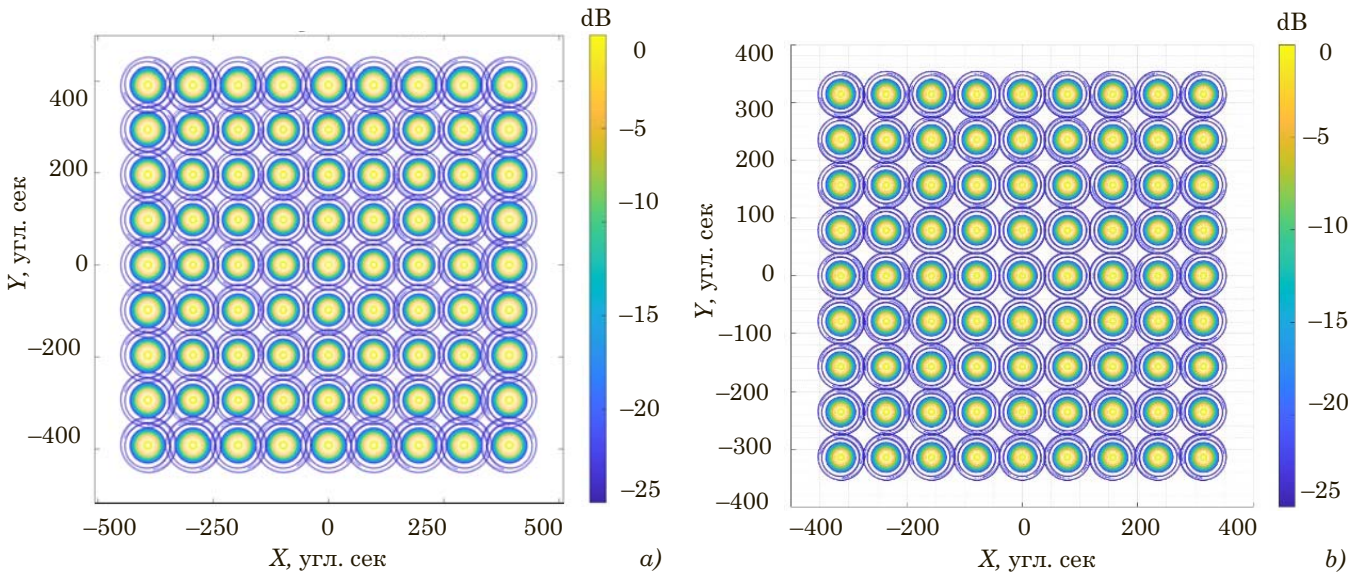
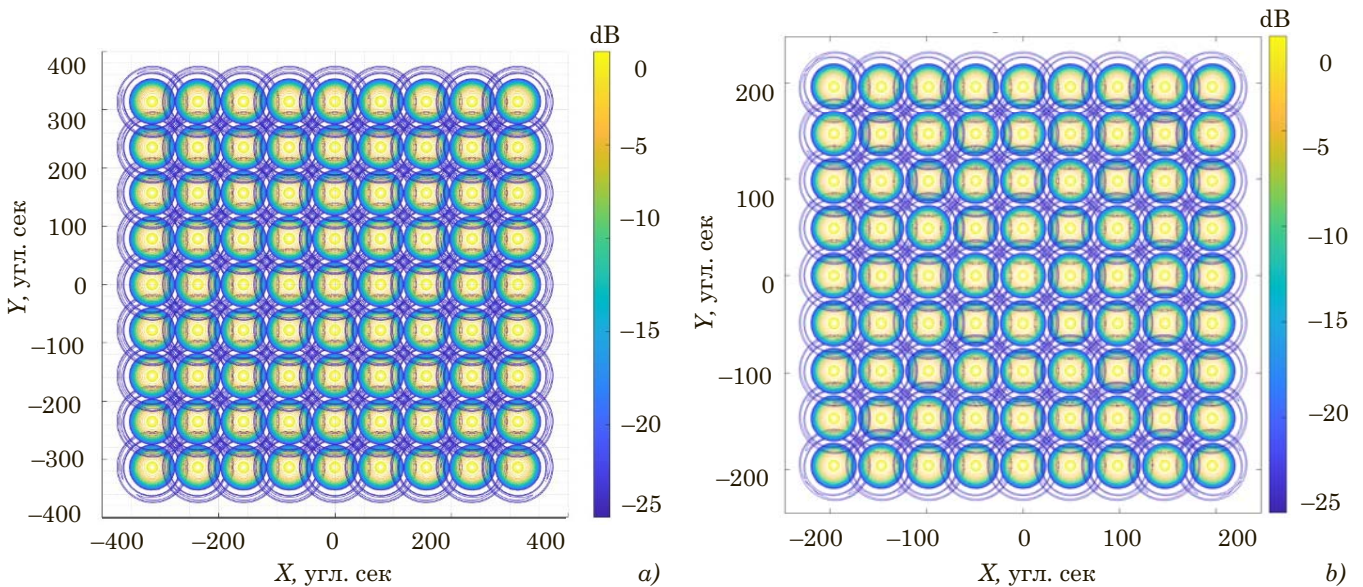


Рис. 4. Осевые ДН на длине волны 3 мм и 2 мм — *a*, внеосевые ДН на длине волны 3 мм (вынос из фокуса 240 мм) и 2 мм (вынос из фокуса 160 мм) — *b*

Кассегрена на длине волны 3 мм и 2 мм. В результате получаем поле зрения  $12' \times 12' / 7' \times 7'$  для плотных и  $16' \times 16' / 11' \times 11'$  для редких матриц на длине волны 3 мм / 2 мм.

Как видно из рис. 5–6, разнос лучей как редкой, так и плотной матриц существенно больше оптимального, равного полуширине ДН (HPBW), что является недостатком использования волноводных матриц наряду с их достоинствами (низкие вносимые потери при облучении и высокая антенная эффективность). Большая плотность упаковки

волноводной матрицы достижима при использовании сложнопрофильных рупоров, в частности сплайно-профильных (Granet et al., 2004, Chernobrovkin et al., 2010). С такими компактными, но высокоэффективными рупорами шаг решетки можно уменьшить на 40 %, а число элементов матрицы увеличить до  $13 \times 13$ , сохранив при этом поле зрения. В этом случае качество получаемых радиоизображений заметно возрастет, но стоимость приемной матрицы существенно (в 2.5 раза) увеличится.

Рис. 5. Многолучевые ДН ESMT редкой матрицы  $9 \times 9$  элементов на длине волны 3 мм — а и 2 мм — бРис. 6. Многолучевые ДН ESMT плотной матрицы  $9 \times 9$  элементов на длине волны 3 мм — а и 2 мм — б

### Оценка абберационных потерь эффективности

Ожидаемые потери эффективности ESMT вследствие рассеяния на отражающей поверхности главного и вторичного зеркал в диапазоне 1 мм не превысят 1–2 %, большие потери в матричном режиме работы ESMT могут дать абберации. Оценить потери эффективности вследствие основных видов аббераций можно, используя оптический подход, предложенный в работе (Padman, 1995). В этом случае формулы для нахождения абберационных потерь имеют вид:

$$\text{астигматизм: } \Delta_{\eta_{ast}} = \left( \frac{\pi D^3}{16 M f d \lambda} \right)^2 \alpha^4,$$

$$\text{кома: } \Delta_{\eta_{ast}} = \frac{1}{2} \left( \frac{\pi D^3}{96 M^2 f^2 \lambda} \right)^2 \alpha^4,$$

$$\text{кривизна: } \Delta_{\eta_{ast}} = \frac{1}{3} \left( \frac{\pi D^3}{16 f d \lambda} \right)^2 \alpha^4,$$

$D$  — диаметр главного зеркала,  $f$  — фокусное расстояние,  $d$  — диаметр вторичного зеркала,  $M$  — увеличение оптической системы,  $\alpha$  — сдвиг луча на небе ( $\alpha = \frac{R_f}{F}$ ,  $R_f$  — сдвиг источника от оси),  $F = M \times f$ .

На рис. 7 приведены абберационные потери апертурной эффективности ESMT при осевом и боковом выносе облучателя из фокуса Кассегрена на длине волны 1–3 мм и КПИ, рассчитанные с помощью оптического подхода для решеток облучателей в частности кома, астигматизм и КПИ.

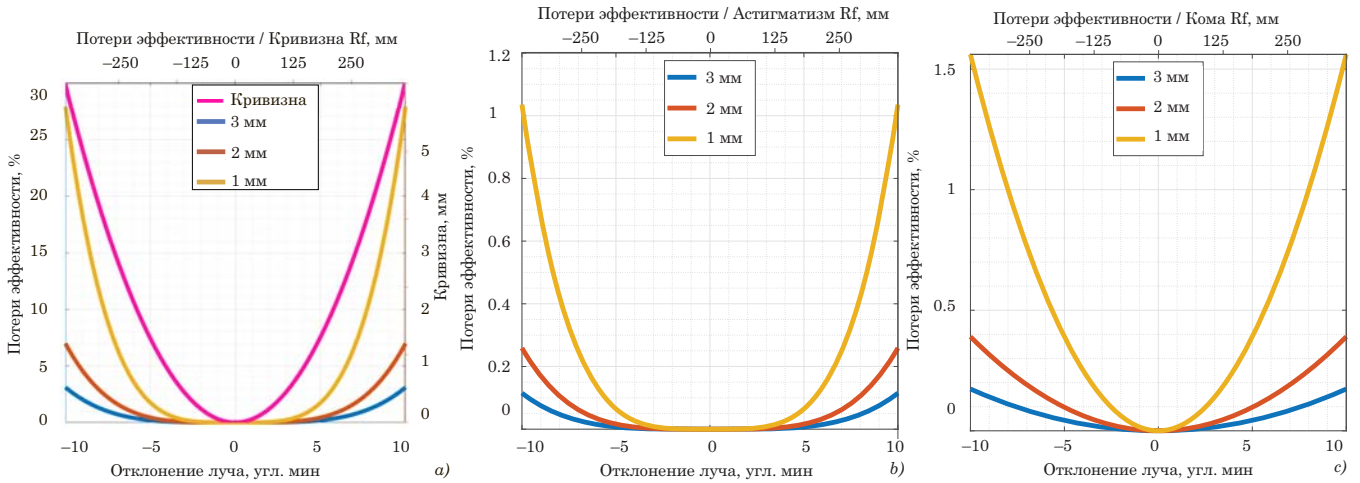


Рис. 7. Аберрационные потери апертурной эффективности ESMT: *a* — кривизна, кривизна поля изображения; *b* — астигматизм; *c* — кома

В табл. 1 приведена ошибка пути в раскрыве по Рузе — Лэмбу (Ruze, 1966; Lamb, 2001) при различных выносах из фокуса, где углы  $\theta_p$  и  $\theta_f$  для параболоида с радиусом  $r$ , фокусом  $f$  и увеличением двухзеркальной антенной системы  $M$  определяются следующим образом:

$$\sin(\theta_p) = \frac{\frac{r}{f}}{1 + (\frac{r}{2f})^2} \quad \sin(\theta_f) = \frac{\frac{r}{Mf}}{1 + (\frac{r}{2Mf})^2}.$$

Потери эффективности по Рузе для относительного радиуса раскрыва  $r = 0 \div 1$ :

$$\frac{G}{G_0} = 1 - \overline{\delta^2} + \overline{\delta}^2,$$

где

$$\overline{\delta^2} = \frac{\int_0^{2\pi} \int_0^1 f(r, \varphi) \delta^2(r, \varphi) r dr d\varphi}{\int_0^{2\pi} \int_0^1 f(r, \varphi) r dr d\varphi},$$

$$\overline{\delta} = \frac{\int_0^{2\pi} \int_0^1 f(r, \varphi) \delta(r, \varphi) r dr d\varphi}{\int_0^{2\pi} \int_0^1 f(r, \varphi) r dr d\varphi}.$$

$f(r, \varphi) = (1 - ar^2)$ , где  $a = 0.75$  для падения на краю раскрыва 12 дБ (Гаусс);  $\delta(r, \varphi) = 2\pi/\Lambda \Delta(r, \varphi)$  — фазовая ошибка в раскрыве, из нее для вычисления аберрационных потерь при боковом выносе нужно убрать линейную часть, обеспечивающую поворот ДН на небо.

На рис. 8–9 приведена разность длин путей в раскрыве при осевом и боковом выносе облучателя и контррефлектора из фокуса на 10 мм, полученная по Рузе — Лэмбу.

Потери от разных видов аберраций можно также рассчитать как (Shillue, 1997):

$$\frac{G}{G_0} = 1 - \overline{\delta^2} + \overline{\delta}^2,$$

где

$$\overline{\delta^2} = \frac{\int_0^{2\pi} \int_0^1 f(r) k^2 \Phi^2(r, \varphi) r dr d\varphi}{\int_0^{2\pi} \int_0^1 f(r) r dr d\varphi},$$

$$\overline{\delta} = \frac{\int_0^{2\pi} \int_0^1 f(r) k \Phi(r, \varphi) r dr d\varphi}{\int_0^{2\pi} \int_0^1 f(r) r dr d\varphi}.$$

Таблица 1

Ошибка пути в раскрыве по Рузе-Лэмбу при различных выносах из фокуса

Вынос из фокуса	Истинная ошибка пути в раскрыве $\Delta(r, \varphi)$	Нормированная к нулю на оси ошибка пути в раскрыве $\Delta(r, \varphi)$
Осевой вынос облучателя на $\Delta z_f$	$-\Delta z_f \cos(\theta_f)$	$\Delta z_f (1 - \cos(\theta_f))$
Боковой вынос облучателя на $\Delta r_f$ при угле $\varphi_0$	$-\Delta r_f \sin(\theta_f) \cos(\varphi - \varphi_0)$	
Осевой вынос контррефлектора на $\Delta z_s$	$-\Delta z_s (\cos(\theta_p) + \cos(\theta_f))$	$-\Delta z_s ((\cos(\theta_p) - 1) + (\cos(\theta_f) - 1))$
Боковой вынос контррефлектора на $\Delta r_s$ при угле $\varphi_0$	$-\Delta r_s (\sin(\theta_p) - \sin(\theta_f)) \cos(\varphi - \varphi_0)$	



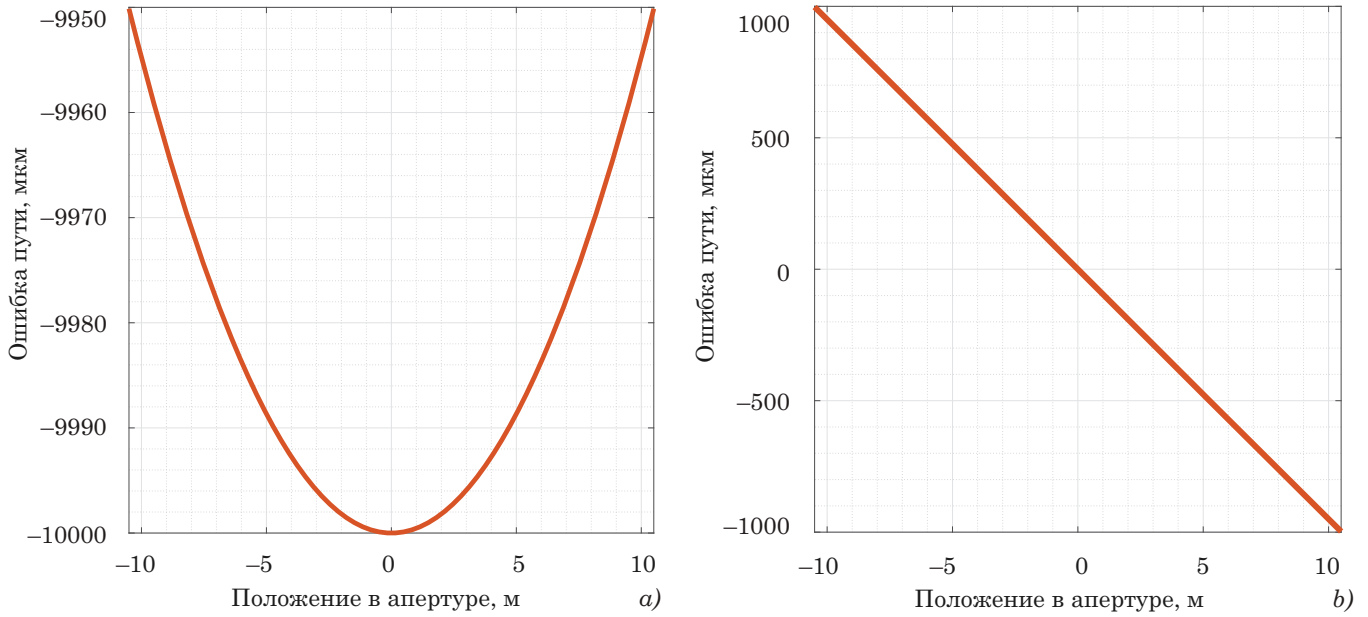


Рис. 8. Разность длин путей в раскрыве: при *a* — осевом и *b* — боковом выносе облучателя их фокуса на 10 мм

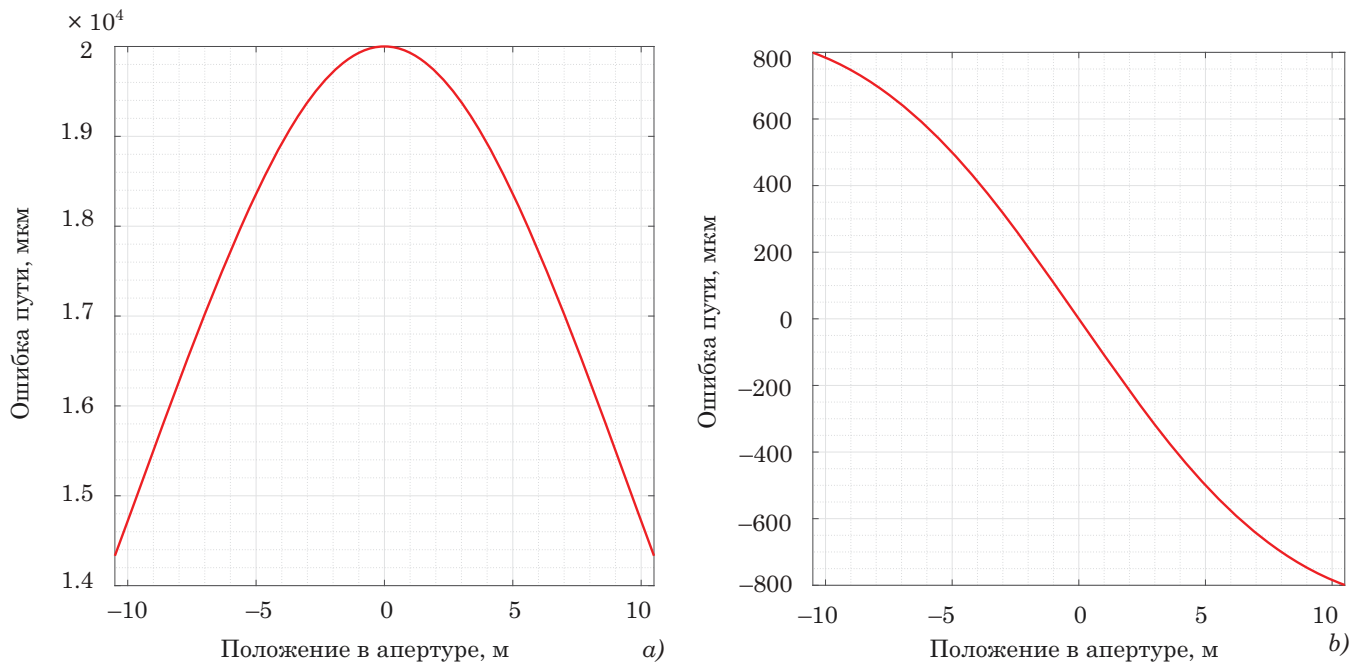


Рис. 9. Разность длин путей в раскрыве: при *a* — осевом и *b* — боковом выносе контррефлектора их фокуса на 10 мм

$f(r) = 0.25 + a(1 - r^2)$ , где  $a = 0.75$  для 12 дБ падения на краю (Гаусс),

$\Phi(r, \varphi) = -C\alpha^2 r^2 \cos^2 \varphi - \frac{1}{2} D\alpha^2 r^2 + E\alpha^3 r \cos \varphi + Far^3 \cos \varphi$  — нелинейная часть набег фазы в раскрыве, где

$$C = -\frac{md}{2f_{eq}d_s} \text{ (астигматизм),}$$

$$D = -\frac{m^2d}{2f_{eq}d_s} \text{ (кривизна),}$$

$$E \approx 0 \text{ (дисторсия),}$$

$$F = \frac{-1}{4f_{eq}^2} \text{ (кома),}$$

$$f_{eq} = Mf.$$

На рис. 10–11 приведена фазовая ошибка в раскрыве при осевом и боковом выносе облучателя и контррефлектора из фокуса, рассчитанная по Рузе — Лэмбу. Линейная часть фазовой ошибки в раскрыве при боковом выносе облучателя и контррефлектора удалена вычитанием фазовой плоскости, найденной методом наименьших квадратов (МНК).

На рис. 12–14 приведены потери, рассчитанные по Рузе — Лэмбу (Ruze, 1966; Lamb, 2001; Butler, 2003) и Шилу (Shillue, 1997) для ESMT и других



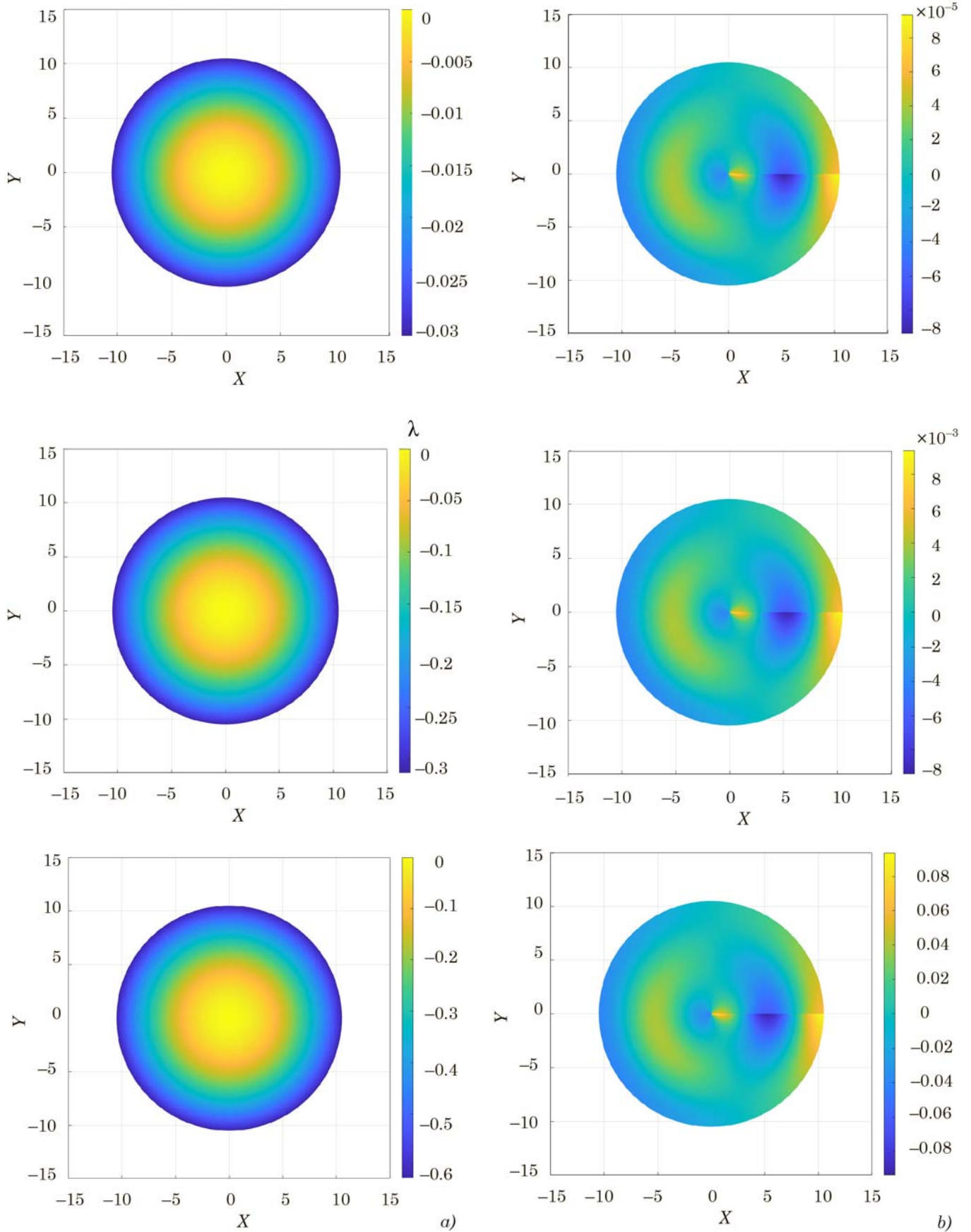


Рис. 10. Фазовая ошибка (рад) в раскрытии ESMT: при *a* — осевом (1, 10 и  $20\lambda$ ) и *b* — боковом (0.2, 20 и  $200\lambda$ ) выносе облучателя из вторичного фокуса

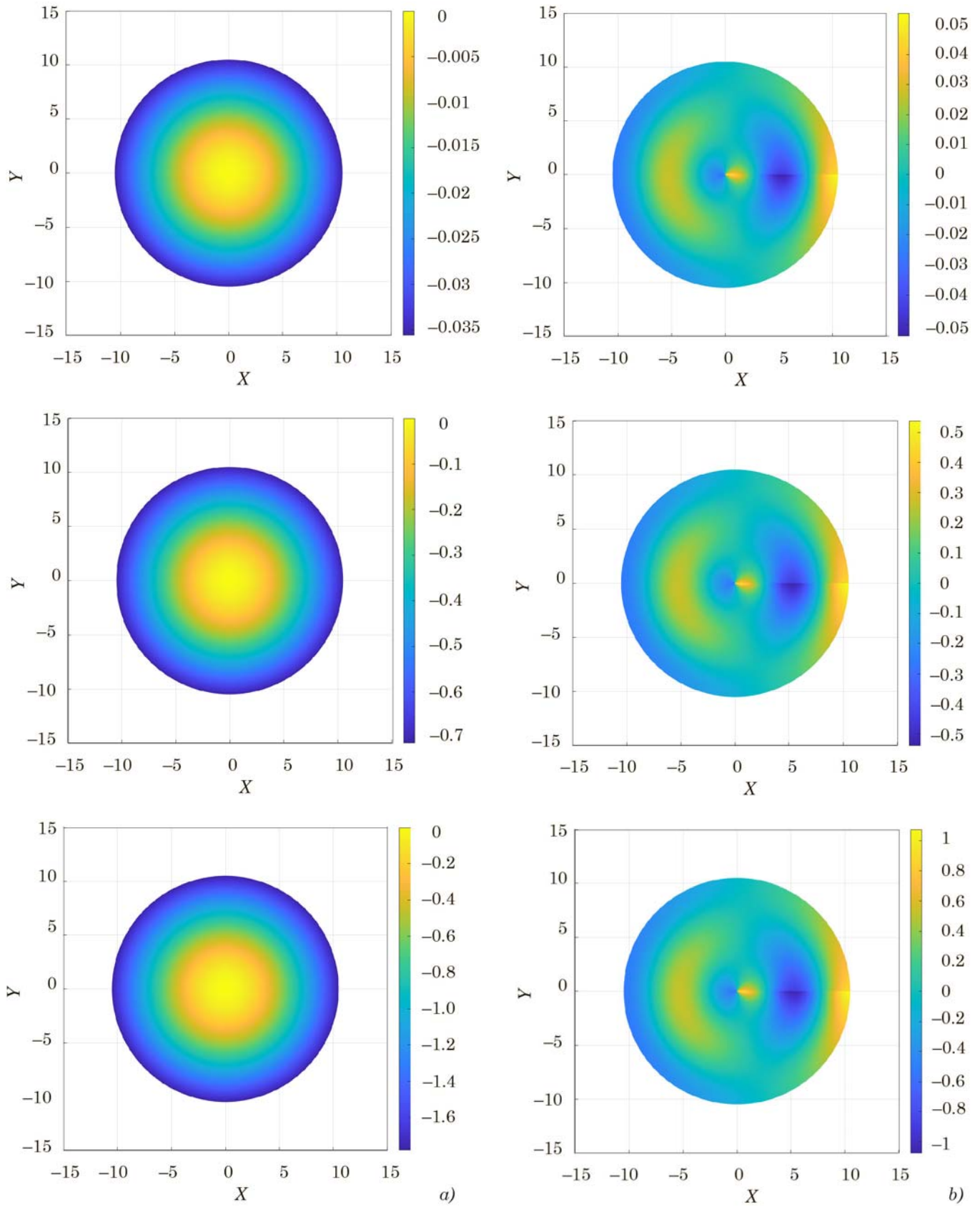


Рис. 11. Фазовая ошибка (рад) в раскрыве ESMT: при *a* — осевом ( $0.01, 0.2$  и  $0.5\lambda$ ) и *b* — боковом ( $0.1, 1$  и  $2\lambda$ ) выносе контррефлектора из первичного фокуса

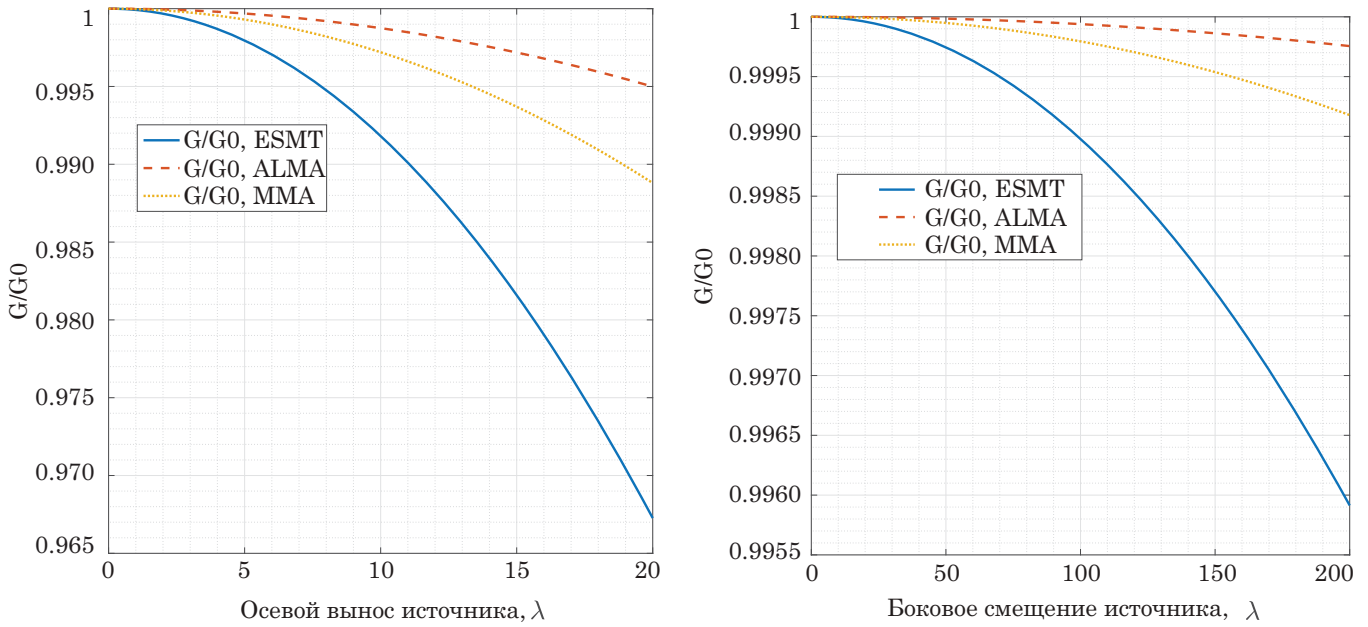


Рис. 12. Потери по Рузе — Лэмбу при осевом и боковом выносах облучателя из фокуса

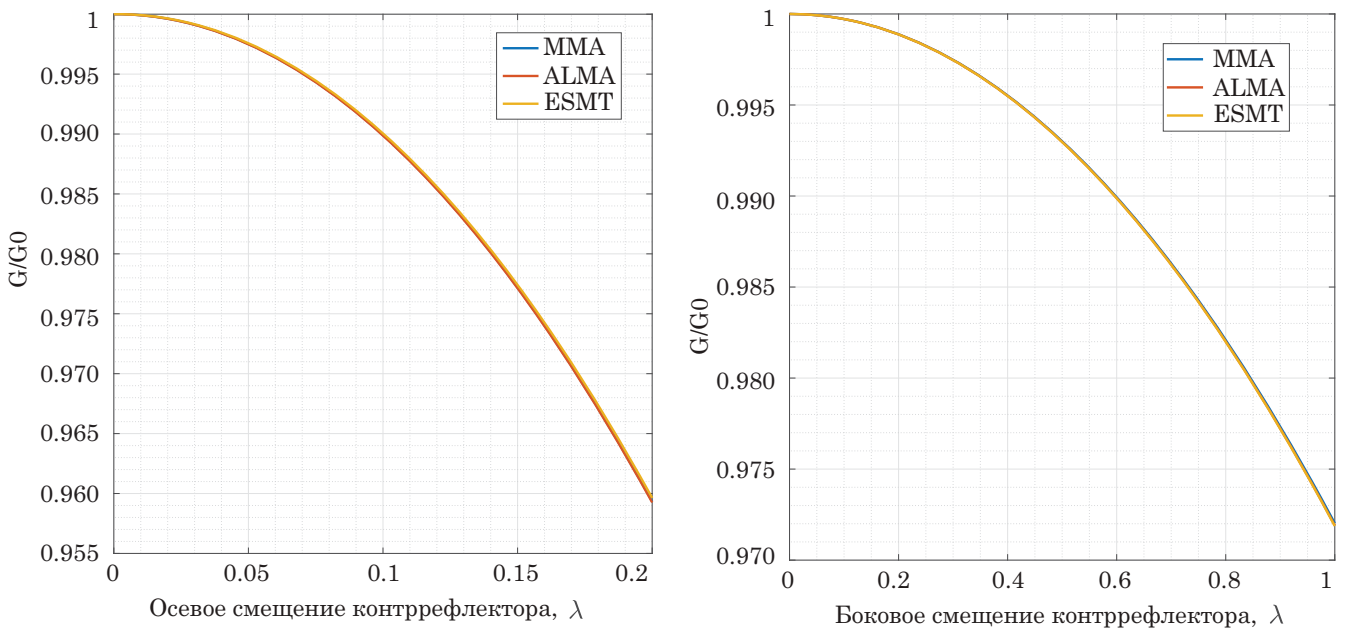


Рис. 13. Потери по Рузе — Лэмбу при осевом и боковом выносе контррефлектора из фокуса

Таблица 2

Параметры инструментов, взятые для расчета абберационных потерь эффективности

Параметры антенны	MMA	ALMA	ESMT
Диаметр главного зеркала, $D$ , мм	8000	12000	21000
Расстояние между вершинами главного и вторичного зеркала, $d$ , мм	2777.27	4716.1	8293.9
Первичное фокусное расстояние, $f$	3040	4800	8.400
Расстояние от первичного до вторичного фокуса, $d_s$ , мм	4562	6177	3923.4
Увеличение системы Кассегрена, $m$	16.35	20	12.5
Эффективное фокусное расстояние Кассегрена, $f_{eq}$ , мм	49680	96000	105000



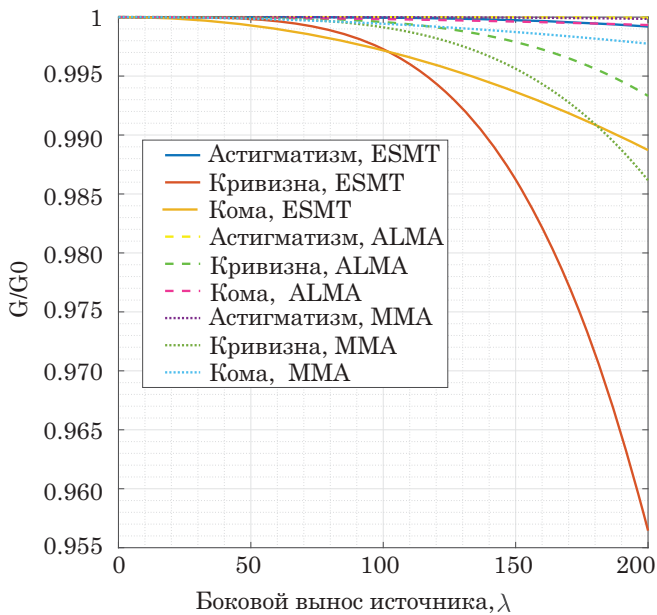


Рис. 14: Потери по Шиллу при боковом выносе облучателя из фокуса

инструментов, параметры которых приведены в табл. 2. Аберрационные потери, полученные различными методами, дали близкие результаты для разных инструментов. Как видно из результатов нашего моделирования, потери при осевом и боковом выносе контррефлектора многократно превышают потери при осевом и боковом выносе облучателя.

Более высокие потери, полученные в работе (Butler, 2003) по Рузе — Лэмбу при осевом и боковом выносе облучателя из фокуса для телескопа ALMA, можно объяснить осевым смещением контррефлектора ALMA с целью незначительной расфокусировки, необходимость которой вызвана расположением коротковолновых облучателей ALMA не вблизи оси, а по окружности диаметром 300 мм. Без осевого смещения контррефлектора диаметр окружности, в которой нужно было разместить 4 коротковолновых диапазона ALMA (Lamb et al., 2001), уменьшился бы до 40 мм, что невозможно реализовать практически. Необходимый осевой сдвиг контррефлектора ALMA составил 2.8 мкм на 1 мм бокового смещения рупора. С целью увеличения диаметра зоны размещения рупоров до 500 мм осевой сдвиг контррефлектора составил 0.7 мм, это вызвало дополнительные потери эффективности менее 1 %, что говорит об оптимальности найденного решения.

В настоящей работе рассмотрены аберрационные потери эффективности в диапазоне 1–3 мм. Возможность эффективной работы ESMT в диапазоне 2 мм и короче также определяется качеством астроклимата. По нашим данным в РФ есть 3 места с астроклиматом, подходящим для разме-

щения субмиллиметрового телескопа класса 20 м с диапазоном до 0.86 мм — это пик Хулугайша в Саянах, АПП Ташанта в Чуйской котловине республики Алтай и два соседних района горного Дагестана (Агульский и Рутульский) (Хайкин и др., 2022; Khaikin et al., 2022; Shikhovtsev et al., 2022).

### Заключение

Рассчитаны многолучевые диаграммы направленности и даны оценки аберрационной эффективности инструментов ESMT в матричном режиме работы из фокуса Кассегрена. Показано, что наиболее значительной аберрацией является кривизна поля изображения, ограничивающая размер плоской матрицы. Сделан вывод о том, что в фокусе Кассегрена целесообразно использование приемных матриц в волноводном исполнении, не требующих оптического согласования с помощью дополнительных зеркал или линз. Наибольший размер плоской матрицы в этом случае не превышает  $10 \times 10$  элементов на волне 2–3 мм, на волне 1 мм потери от кривизны поля изображения при таком размере плоской матрицы уже превышают 15–20 %. Максимально достижимое эффективное поле зрения ESMT из фокуса Кассегрена составляет  $15' \times 15'$  при размере плоской матрицы в волноводном исполнении  $0.5 \text{ м} \times 0.5 \text{ м}$ . Как показали наши расчеты, аберрационные потери эффективности в выбранной оптической схеме ESMT не превышают аберрационные потери эффективности телескопов ALMA и MMA.

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ 223-72-00041.

### Литература

- Хайкин В. Б., Шиховцев А. Ю., Шмагин В. Е. и др. О проекте евразийских субмиллиметровых телескопов (ESMT) и возможности применения адаптивной оптики для улучшения качества субмм изображений // Журнал радиоэлектроники. 2022. № 7.
- Akiyama K., Alberdi A., Alef W., et al. First Sagittarius A\* event horizon telescope results. I. The shadow of the supermassive black hole in the center of the Milky Way // Astrophysical Journal Letters. 2022. Vol. 930, Iss. 2. URL: <http://dx.doi.org/10.3847/2041-8213/ac6674> (дата обращения 06.06.2023).
- Butler B. J. Requirements for subreflector and feed positioning for ALMA antennas. ALMA Memo 479. NRAO, 2003.
- Chernobrovkin R., Popenko N., Khaikin V., et al. Compact Efficient Feed-Horn at 30–38 GHz for a multi-beam radio telescope // J Infrared Milli Terahz Waves. 2010. no. 31, P. 840–851.
- Granet C., James G. L., Bolton R., Moorey G. A smooth-walled spline-profile horn as an alternative to the corrugated horn for wide band millimeter-wave applications // IEEE Transactions on Antennas and Propagation.

2004. Vol. 52, no. 3. P. 848–854. doi: 10.1109/TAP.2004.825156.

*Duan R., Li Z., Zhang L., et al.* KID based submillimeter instrument for Eurasian Sub-Millimeter telescopes // Ground-Based Astronomy in Russia. 21st Century. Proceedings of the All-Russian Conference, 21–25 September, 2020, Nizhny Arkhyz, Russia. 2020. P. 384–389.

*Duan R., Khaikin V., Lebedev M., et al.* Toward Eurasian Submillimeter Telescopes: the concept of multicolor subTHz MKID-array demo camera MUSICAM and its instrumental testing // Proc. 7th All-Russian Microwave Conf. 25–27 November, 2020, Moscow, Russia. P. 41–46. doi: 10.1109/RMC50626.2020.9312270.

*Khaikin V., Lebedev M., Shmagin V., et al.* On the Eurasian Submillimeter Telescopes Project (ESMT) // Proc. 7th All-Russian Microwave Conf. 25–27 November, 2020, Moscow, Russia. P. 47–51. doi: 10.1109/RMC50626.2020.9312233.

*Khaikin V., Lebedev M.* Simulation of radiation pattern of a large MM wave radio telescope with offset feed // Proc. EuCAP 2006, IEEE. 2006.

*Khaikin V. B., Shikhovtsev A. Yu., Mironov A. P., Xuan Qian.* A study of the astroclimate in the Dagestan mountains Agul region and at the Ali Observatory in Tibet as possible locations for the Eurasian SubMM Telescopes (ESMT). PoS, 2022. doi: <https://doi.org/10.22323/1.425.0072>.

*Lamb J. W.* Verification of Ruze formulas by comparison with ray-tracing. OVRO, Caltech, 2001.

*Lamb J. W., Baryshev A., Carter M. C., et al.* ALMA Receiver Optics Design. ALMA Memo 362. NRAO, 2001. 34 p.

*Majorova E., Khaikin V.* Characteristics of radio telescopes with multielement microstrip focal arrays // Radiophysics. 2005. Vol. XLVIII, no. 2. P. 95–109.

*Marchiori G., Rampini F., Tordi M., et al.* Towards the Eurasian Submillimeter Telescope (ESMT): telescope concept outline and first results // Ground-Based Astronomy in Russia. 21st Century, Proceedings of the All-Russian Conference, 21–25 September, 2020, Nizhny Arkhyz, Russia. 2020. P. 378–383.

*Padman R.* Optical fundamentals for array feeds // Multi-Feed Systems for Radio Telescopes, APS Conference Series. 1995. Vol. 7.

*Ruze J.* Antenna tolerance theory—A review // Proceedings of the IEEE. 1966. Vol. 54, no. 4. P. 633–640. doi: 10.1109/PROC.1966.4784.

*Shillue B.* MMA Memo 175: Gain degradation in a symmetrical Cassegrain Antenna due to the lateral offset feeds. 1997, NRAO.

*Shikhovtsev A. Y., Kovadlo P. G., Khaikin V. B., Kiselev A. V.* Precipitable water vapor and fractional clear sky statistics within the Big Telescope Alt-Azimuthal Region. Remote Sens. 2022, 14, 6221. URL: <https://doi.org/10.3390/rs14246221>.

*Woody D., Padin S., Chauvin E., et al.* The CCAT 25m diameter submillimeter-wave telescope // Proc. SPIE. Vol. 8444, 844442M. 2012. 14 p.