

ОТЧЕТ МСЭ-R SA.2098

Математические модели усиления антенн с большой апертурой земных станций службы космических исследований для изучения вопросов совместимости при наличии большого числа распределенных источников помех

(2007)

1 Введение

Исследования совместимости земных станций службы космических исследований (СКИ) и фиксированных систем высокой плотности проводятся в полосах частот 31,8–32,3 ГГц и 37–38 ГГц.

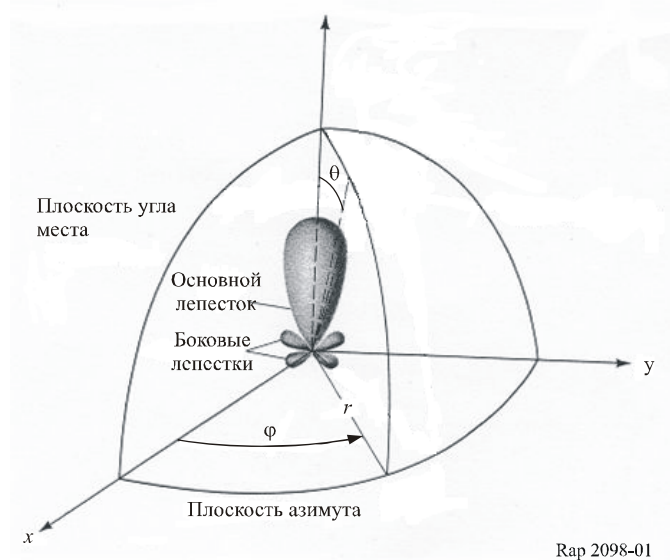
Одним из ключевых параметров, подлежащим определению для оценки уровня потенциальных помех земным станциям СКИ, является диаграмма направленности антенны, которая должна использоваться в расчетах. Диаграмма направленности излучения для огибающей пиковых уровней для фиксированных беспроводных систем представлена в Рекомендации МСЭ-R F.699, диаграмма направленности излучения, на которой показаны средние уровни боковых лепестков для радиорелейных систем прямой видимости, используемых для связи пункта с пунктом, представлена в Рекомендации МСЭ-R F.1245. Диаграмма, содержащаяся в Рекомендации МСЭ-R F.699, при применении только к полярным углам, превышающим 1° , аналогична диаграмме, содержащейся в Рекомендации МСЭ-R SA.509. Диаграммы направленности излучения для огибающей пиковых уровней для земных станций, работающих в фиксированной спутниковой службе (ФСС), представлены в Рекомендациях МСЭ-R S.580 и МСЭ-R S.465, диаграмма направленности излучения, отражающая средние уровни боковых лепестков земных станций фиксированной спутниковой службы, представлена в Рекомендации МСЭ-R S.1428. В настоящем Отчете проводится сравнение характеристик этих диаграмм, а также представлена новая модель.

Фактические и реалистичные диаграммы определяются многими факторами, слишком сложными и разнообразными для того, чтобы их можно было учесть в простых теоретических расчетах. Например, положения нулей и пиков в области боковых лепестков изменяются как функция гравитационной нагрузки антенны, ветра и т. д. и наилучшим образом представляются в форме огибающей. С течением времени было предложено большое число моделей диаграмм направленности излучения для больших зеркальных антенн (см., например, Рекомендацию МСЭ-R F.1245-1 "Математическая модель усредненных диаграмм направленности антенн магистральных радиорелейных систем прямой видимости для использования при изучении определенных вопросов координации и оценке помех в диапазоне частот от 1 до примерно 70 ГГц", Рекомендацию МСЭ-R SA.509-2 "Диаграммы направленности антенны земной станции космических исследований и радиоастрономической антенны, предназначенных для использования в расчетах помех, включая процедуры координации", Рекомендацию МСЭ-R SA.1345 "Методы предсказания диаграмм направленности больших антенн, используемых для космических исследований и для радиоастрономии" и [Jamnejad, 2003]).

Простым, но эффективным методом получения характеристик реальной диаграммы направленности антенны является использование модели, в основу которой положено множество теоретических и экспериментальных результатов и которая определяет верхнюю и/или нижнюю границы или огибающую для антенны, легко применимую во многих ситуациях. В идеальном случае, как указано в Рекомендации МСЭ-R F.1245, следуя определению направленности антенны, модель усиления G в дБ должна удовлетворять уравнению для коэффициента усредненного усиления, g_a :

$$g_a = \frac{1}{4\pi} \int_0^{2\pi} \int_0^\pi g(\theta, \varphi) \sin(\theta) d\theta d\varphi = 1,$$

где θ – полярный угол относительно линии прицеливания, а φ – азимутальный угол, которые показаны на нижеследующем рисунке:



Для кругообразно симметричной диаграммы направленности уравнение имеет сокращенную форму:

$$g_a = \frac{1}{2} \int_0^\pi g(\theta) \sin(\theta) d\theta = 1.$$

Типовые модели усиления выражаются в дБ в форме параметра G , следующим образом относящегося к коэффициенту усиления g :

$$G(\theta, \varphi) = 10 \log(g(\theta, \varphi))$$

или

$$g(\theta, \varphi) = 10^{\frac{G(\theta, \varphi)}{10}}$$

В моделях, которые обычно предлагаются в литературе, вследствие того, что вместо фактической диаграммы направленности используется огибающая верхнего предела или иные приближенные представления, усредненные уровни усиления, рассчитанные с использованием вышеприведенных интегралов, значительно превышают единицу (или больше 0 в дБ). Однако они могут использоваться для проверки допустимости в целях оценки общей точности модели по сравнению с диаграммой направленности реальной антенны. Как правило, значение менее или порядка 2 (менее 3 дБ) дает приемлемую аппроксимацию.

В данном Отчете проведена оценка включающей интеграл левой части в численной форме для ряда кругообразно симметричных моделей усиления и представлены графики разброса его значений как функции параметров антенны, таких как частота и диаметр апертуры.

2 Модели усиления

Во всех приведенных ниже моделях значения усиления определяются в дБ, углы – в градусах и:

D : диаметр основной апертуры антенны (м)

$$\lambda = \frac{c}{f} = \frac{0,3}{f_{ГГц}}, \text{ длина волны (м) .}$$

В настоящем Отчете мы рассматриваем только антенны с большим диаметром, у которых $D/\lambda > 100$.

а) Модель Рекомендации МСЭ-R F.699-7

В Рекомендации МСЭ-R F.699-7 предлагается следующая диаграмма направленности излучения (максимальная огибающая) для диапазона частот 1–70 ГГц:

$$\begin{aligned} G(\theta) &= G_{max} - 2,5 \times 10^{-3} \left(\frac{D}{\lambda} \theta \right)^2 && \text{при } 0 < \theta < \theta_m \\ G(\theta) &= G_1 && \text{при } \theta_m \leq \theta < \theta_r \\ G(\theta) &= 32 - 25 \log_{10}(\theta) && \text{при } \theta_r \leq \theta < 48^\circ \\ G(\theta) &= -10 && \text{при } 48^\circ \leq \theta \leq 180^\circ. \end{aligned}$$

Следует отметить, что если принимается значение θ_r равным 1, тогда модель усиления Рекомендации МСЭ-R F.699-7, определяемого в диапазоне от 1° до 180° , аналогична модели в Рекомендации МСЭ-R SA.509.

При:

$$\begin{aligned} G_{max} &= 10 \log \left(\eta \left(\frac{\pi D}{\lambda} \right)^2 \right) \\ G_1 &= 2 + 15 \log_{10} \left(\frac{D}{\lambda} \right) \\ \theta_m &= 20 \sqrt{G_{max} - G_1} \left(\frac{D}{\lambda} \right)^{-1} && \text{градусов} \\ \theta_r &= 15,85 \left(\frac{D}{\lambda} \right)^{-0,6} && \text{при } D/\lambda > 100. \end{aligned}$$

б) Модель Рекомендации МСЭ-R RA.1631

Францией была предложена для использования модель, представленная в Рекомендации МСЭ-R RA.1631. Это не огибающая пиковых уровней, но усредненная диаграмма направленности, определяемая уравнениями:

$$\begin{aligned} G(\theta) &= G_{max} - 2,5 \times 10^{-3} \left(\frac{D}{\lambda} \theta \right)^2 && \text{при } 0^\circ < \theta < \theta_m \\ G(\theta) &= G_1 && \text{при } \theta_m \leq \theta < \theta_r \\ G(\theta) &= 29 - 25 \log_{10}(\theta) && \text{при } \theta_r \leq \theta < 10^\circ \\ G(\theta) &= 34 - 30 \log_{10}(\theta) && \text{при } 10^\circ \leq \theta < 34,1^\circ \\ G(\theta) &= -12 && \text{при } 34,1^\circ \leq \theta < 80^\circ \end{aligned}$$

$$G(\theta) = -7 \quad \text{при } 80^\circ \leq \theta < 120^\circ$$

$$G(\theta) = -12 \quad \text{при } 120^\circ \leq \theta \leq 180^\circ$$

при:

$$G_{max} = 20 \log \left(\frac{\pi D}{\lambda} \right)$$

$$G_1 = -1 + 15 \log_{10} \left(\frac{D}{\lambda} \right)$$

$$\theta_m = 20 \sqrt{G_{max} - G_1} \left(\frac{D}{\lambda} \right)^{-1} \quad \text{градусов}$$

$$\theta_r = 15,85 \left(\frac{D}{\lambda} \right)^{-0,6} \quad \text{градусов,} \quad \text{или } \theta_r = 10^{1,28k^2 - 0,08k} \left(\frac{D}{\lambda} \right)^{-0,6k} \quad \text{градусов}$$

$$\theta_r = 15,85 \left(\frac{D}{\lambda} \right)^{-0,6} \quad \text{градусов, при } k = 1.$$

с) **Модель Рекомендации МСЭ-R F.1245-1**

В Рекомендации МСЭ-R F.1245-1 предлагается следующая усредненная диаграмма направленности для диапазона частот 1–40 ГГц и предварительно для диапазона частот 40–70 ГГц:

$$G(\theta) = G_{max} - 2,5 \times 10^{-3} \left(\frac{D}{\lambda} \theta \right)^2 \quad \text{при } 0^\circ < \theta < \theta_m$$

$$G(\theta) = G_1 \quad \text{при } \theta_m \leq \theta < \theta_r$$

$$G(\theta) = 29 - 25 \log_{10}(\theta) \quad \text{при } \theta_r \leq \theta < 48^\circ$$

$$G(\theta) = -13 \quad \text{при } 48^\circ \leq \theta \leq 180^\circ$$

при:

G_{max} : максимальное усиление

$$G_1 = 2 + 15 \log_{10} \left(\frac{D}{\lambda} \right)$$

$$\theta_m = 20 \sqrt{G_{max} - G_1} \left(\frac{D}{\lambda} \right)^{-1}$$

$$\theta_r = 12,02 \left(\frac{D}{\lambda} \right)^{-0,6}.$$

d) **Модель Jr (огibaющая пиковых уровней)**

Это – новая модель, представляющая огibaющую пиковых уровней, для всех исследуемых диапазонов частот. Она аналогична модели Рекомендации МСЭ-R F.699, но с некоторыми изменениями. Изменения сделаны в следующих областях:

- i) Ширина главного лепестка диаграммы направленности может изменяться в зависимости от разных параметров антенны, таких как распределение поля по апертуре, затенение, погрешности поверхности и т. д. Односторонняя ширина луча по уровню половинной мощности определяется как $\theta_{hp} = 0,5C_{hp}/(D/\lambda)$, где постоянная C_{hp} имеет приближенное значение между 65 и 71. В случае более точного моделирования этот параметр может изменяться в зависимости от типа и качества используемой антенны. В настоящем документе выбрано значение $C_{hp} = 69$ для обеспечения совместимости с Рекомендацией МСЭ-R F.699.
- ii) Плоская плечевая зона имеет более реалистическое значение. Как правило, это значение не зависит от размеров антенны или от длины волны, а является довольно сложной функцией распределения поля по апертуре и затенения. Используется значение 17 дБ, которое при необходимости может быть уточнено.
- iii) При определении пикового уровня и уклона диаграммы направленности модели учитывается эффективность диаграммы направленности. Это является отличием от других моделей, в которых рассматривается фиксированный наклон. Эффективность диаграммы направленности является комбинацией коэффициента распределения поля по апертуре, коэффициента затенения, коэффициента перелива энергии и коэффициента, обусловливаемого погрешностями поверхности. Мы отделяем эффективность в компонент допуска на погрешности поверхности, который напрямую зависит от частоты, и собираем все остальные в отдельный компонент, который в той или иной степени зависит от частоты.
- iv) В области заднего лепестка диаграммы направленности в диапазоне от 80° до 120° введена поднятая на 5 дБ платформа для учета возможных эффектов перелива энергии за края основного зеркала, точная высота и местоположение которого меняются в зависимости от F/D (отношение фокусного расстояния к диаметру) и других проектных параметров зеркальной антенны. В редких случаях к этой платформе применимы положения примечания 2, ниже.

Таким образом, диаграмма направленности модели определяется следующим образом:

$$\begin{aligned}
 G(\theta) &= G_0 - 3\left(\frac{\theta}{\theta_{hp}}\right)^2 && \text{при } 0^\circ \leq \theta \leq \theta_1 \\
 G(\theta) &= G_0 - G_1 && \text{при } \theta_1 < \theta \leq \theta_2 \\
 G(\theta) &= G_0 - G_1 - G_2 \log_{10}\left(\frac{\theta}{\theta_2}\right) && \text{при } \theta_2 < \theta \leq \theta_3 \\
 G(\theta) &= G_3 && \text{при } \theta_3 < \theta \leq 80^\circ \\
 G(\theta) &= G_3 + 5 && \text{при } 80^\circ < \theta \leq 120^\circ \\
 G(\theta) &= G_3 && \text{при } 120^\circ < \theta \leq 180^\circ,
 \end{aligned}$$

где:

$$\begin{aligned}
 G_0 &= 10 \cdot \log_{10}\left[\eta_a \left(\frac{\pi D}{\lambda}\right)^2\right] - 4,343 \left(\frac{4\pi h_{rms}}{\lambda}\right)^2 \\
 G_1 &= 17 \\
 G_2 &= 27 + 10 \left[\log_{10}(\eta_a) - \log_{10}\left(60 \frac{h_{rms}}{\lambda}\right)\right] \\
 G_3 &= -10
 \end{aligned}$$

$$\theta_{hp} = 0,5 \frac{C_{hp}}{(D/\lambda)} \quad (65 \leq C_{hp} \leq 70, \text{ номинальное значение} = 69)$$

$$\theta_1 = \theta_{hp} \sqrt{\frac{G_1}{3}}$$

$$\theta_2 = \theta_{hp} 10^{\frac{G_1}{G_2}} \sqrt{\frac{G_2}{36}}$$

$$\theta_3 = \theta_2 10^{\frac{G_0 - G_1 - G_3}{G_2}}.$$

Значение η_a отражает зависящий от диаграммы направленности (распределение поля по апертуре, перелив энергии, затенение и т. д.) коэффициент использования антенны, за исключением составляющей, связанной с допуском на погрешности поверхности. Следует отметить, что в этой модели усиление по линии прицеливания уменьшается согласно η_a , а угол наклона усиления G_2 в угловом диапазоне между θ_2 и θ_3 возрастает согласно η_a . Это отражает физическую реалию, заключающуюся в том, что увеличение максимального усиления должно сопровождаться усилением в зонах боковых лепестков. Эта характеристика в другие модели не включена.

ПРИМЕЧАНИЕ 1. – Потери усиления, обуславливаемые допусками на погрешности поверхности, включены отдельно как функция h_{rms} , допуска на погрешности поверхности, который также воздействует на крутизну модели диаграммы направленности. Допустимый диапазон допуска на погрешности поверхности для использования в приведенной выше формуле составляет:

$$\frac{1}{60} \leq \frac{h_{rms}}{\lambda} \leq \frac{1}{15}.$$

Любое значение h_{rms}/λ выше 1/15 должно быть заменено значением 1/15; любое значение ниже 1/60 должно быть заменено значением 1/60.

Таким образом, возможно использовать значение 1/60 для антенны очень хорошего качества, значение 1/30 для антенны относительно хорошего качества и значение 1/15 для антенны плохого качества.

ПРИМЕЧАНИЕ 2. – В редких случаях при больших погрешностях поверхности значение θ_3 может превышать 80° , и может произойти наложение зоны боковых лепестков и плоского выступа в диапазоне 80° – 120° . В таких случаях должно выбираться максимальное значение обоих для каждого угла.

е) Модель Ja (усредненный уровень)

В дополнение к огибающей пиковых уровней может быть определена огибающая усредненных уровней для усиления при любом данном угле в зоне боковых лепестков, которая имеет смысл в следующем аспекте. Допустим, что имеется некоторое число антенн и фиксированный данный угол относительно линии прицеливания. Поскольку антенны не одинаковы, их боковые лепестки могут быть сдвинуты, так что пик лепестков одной антенны соответствует данному направлению, в то время как другая антенна характеризуется нулями в этом направлении, а значение третьей антенны может лежать между пиком и нулем и т. д. Таким образом, для определения усиления в данном направлении предположительно можно использовать усредненное значение, которое является средним значением всех этих уровней – от нуля до пика. Оказывается, что в случае данного лепестка с точными нулями его среднее значение близко к значению на 3 дБ ниже пика лепестка (как правило, меньше, если нули неточные и до некоторой степени заполнены). Далее, если допустить, что модель огибающей пиковых уровней проходит через все пиковые точки лепестков, тогда огибающая усредненных уровней является параллельной этой огибающей, но ниже нее примерно на 3 дБ.

Соответственно, модель огибающей "усредненных уровней" получаем путем несложного изменения вышеописанной модели, – увеличивая значение G_1 на 3 дБ, уменьшая значение G_3 на 3 дБ и изменяя соответствующим образом значение θ_2 . При применении данной модели к конкретным исследуемым ситуациям следует соблюдать осторожность. Модель описывается следующим образом:

$$G(\theta) = G_0 - 3 \left(\frac{\theta}{\theta_{hp}} \right)^2 \quad \text{при } 0^\circ \leq \theta \leq \theta_1$$

$$G(\theta) = G_0 - G_1 \quad \text{при } \theta_1 < \theta \leq \theta_2$$

$$G(\theta) = G_0 - G_1 - G_2 \log_{10} \left(\frac{\theta}{\theta_2} \right) \quad \text{при } \theta_2 < \theta \leq \theta_3$$

$$\begin{aligned}
 G(\theta) &= G_3 && \text{при } \theta_3 < \theta \leq 80^\circ \\
 G(\theta) &= G_3 + 5 && \text{при } 80^\circ < \theta \leq 120^\circ \\
 G(\theta) &= G_3 && \text{при } 120^\circ < \theta \leq 180^\circ,
 \end{aligned}$$

где:

$$G_0 = 10 \log_{10} \left[\eta_a \left(\frac{\pi D}{\lambda} \right)^2 \right] - 4,343 \left(\frac{4\pi h_{rms}}{\lambda} \right)^2$$

$$G_1 = 20$$

$$G_2 = 27 + 10 \left[\log_{10}(\eta_a) - \log_{10} \left(60 \frac{h_{rms}}{\lambda} \right) \right]$$

$$G_3 = -13$$

$$\theta_{hp} = 0,5 \frac{C_{hp}}{(D/\lambda)} \quad (65 \leq C_{hp} \leq 70, \text{ номинальное значение} = 69)$$

$$\theta_1 = \theta_{hp} \sqrt{\frac{G_1}{3}}$$

$$\theta_2 = \theta_{hp} 10^{\frac{G_1-3}{G_2}} \sqrt{\frac{G_2}{36}}$$

$$\theta_3 = \theta_2 10^{\frac{G_0 - G_1 - G_3}{G_2}}$$

Все примечания в модели Jp аналогичным образом применимы к модели Ja.

3 Численный анализ и результаты

Для расчета и построения графиков, а также сравнения разных моделей усиления и их "усредненного" усиления было написано несколько программ MATLAB. Эти программы весьма просты в использовании и позволяют легко добавлять новые модели для анализа и построения графиков. С помощью этих программ были получены следующие результаты.

Каждый график на рисунках 1-6 (а, b, с) представляет для сравнения несколько моделей. Это модель огибающей усредненных уровней в Рекомендации МСЭ-R F.699-7 (которая при углах выше 1° аналогична модели, представленной в Рекомендации МСЭ-R SA.509), модель огибающей усредненных уровней в Рекомендации МСЭ-R F.1245-1, модель огибающей усредненных уровней в Рекомендации МСЭ-R RA.1631 и, наконец, новая предлагаемая модель огибающей пиковых уровней "Jp", полученная на основании модели, представленной в Рекомендации МСЭ-R F.699.

Сравнение при $D/\lambda = 1000$ (например, антенна диаметром 34 м, работающая на частоте вблизи 8,4 ГГц)

На рисунках 1–3 представлены графики для антенны диаметром 1000 длины волны, что соответствует апертуре диаметра 34 метра, работающей на частотах вблизи полосы 8,4 ГГц, которая интенсивно используется для исследований дальнего космоса. Диаграммы направленности согласно моделям Jp и Ja представлены для антенн "плохого", "среднего" и "хорошего" качества, что соответствует среднеквадратическому (rms) допуску на погрешности поверхности 1/15, 1/30 и 1/60 длины волны, соответственно. Случаи а), b) и с) относятся к линейному, расширенному линейному и логарифмическому представлению угла, изменяющегося в горизонтальной плоскости.

Сравнение при $D/\lambda = 4000$ (например, антенна диаметром 34 м, работающая вблизи полос частот 32 и 37 ГГц)

На рисунках 4–6 представлены графики для антенн диаметром 4000 длины волны, что соответствует апертуре диаметра 34 м метра, работающей на частотах вблизи полос 32 и 37 ГГц, в которых

проводятся исследования совместного использования частот системами исследования дальнего космоса и применения высокой плотности в фиксированной службе (ВП-ФС).

Параметры, зависящие от допуска на погрешность поверхности

Как можно видеть для предложенных моделей Jr и Ja, параметры усиления основного луча и областей боковых лепестков изменяются при изменении допуска на погрешность поверхности. В моделях Jr и Ja начальное значение коэффициента использования апертуры принимается равным $\eta_a = 0,8$, не включая воздействия допуска на погрешность поверхности. Это – типовое значение комбинации апертуры и перелива энергии для номинального значения 10–11 дБ на границе апертуры. Это начальное значение умножается на коэффициент допуска на погрешность поверхности для получения чистого коэффициента использования поверхности апертуры антенны. Коэффициенты допуска на погрешность поверхности включены в формулы, и для "плохого", "среднего" и "хорошего" случаев составляют 0,5, 0,9 и 1,0, соответственно. Следовательно, чистый коэффициент использования поверхности апертуры для этих трех случаев составляет 0,4, 0,7 и 0,8, соответственно. Следует заметить, что этот коэффициент использования поверхности апертуры должен быть умножен на другие коэффициенты потерь, такие как потери в рупорном облучателе, с тем чтобы получить общий коэффициент использования поверхности антенны. В случае других моделей допуск на погрешность поверхности в явном виде не рассматривается. В этих моделях для всех случаев коэффициент использования поверхности апертуры принимается равным 0,7.

Для антенн с большой апертурой, используемых в исследованиях дальнего космоса в сети исследования дальнего космоса НАСА, например, допуск на погрешности поверхности антенн диаметра 34 м в случае реализации может характеризоваться как "хороший" на частотах 8,4 ГГц и 2,3 ГГц, между "средним" и "хорошим" на частотах 32 ГГц и потенциально "средний" на частоте 37 ГГц. Допуск на погрешности поверхности антенн диаметром 70 м в случае реализации может характеризоваться как "хороший" на частотах 8,4 ГГц и 2,3 ГГц и как потенциально "плохой" на частоте 32 ГГц.

Усиление, усредненное по всем углам

На рисунках 7–9 (а, б) показано сравнение усиления, усредненного по всем углам согласно приведенным выше уравнениям, для разных обсуждаемых моделей при использовании моделей антенн "плохого", "среднего" и "хорошего" качества для случаев Jr и Ja. Случаи а) и б) обеспечивают усредненное усиление в дБ и линейную шкалу, соответственно. Как видно по рисункам, модели Jr и Ja согласованы на протяжении диапазона значений отношения D/λ (отношение диаметра антенны к длине волны). При более высоких значениях отношения D/λ , около 4000, случай "среднего качества" показывает более низкое усредненное усиление, а случаи "хорошего качества" – значительно более низкое усредненное усиление по сравнению с другими моделями.

На рисунке 10 (а, б) показан аналогичный набор графиков для случая антенны диаметром 34 м (характеризующейся среднеквадратическим значением погрешности поверхности 0,25 мм) по всему диапазону частот от 1 до 40 ГГц. Цифры показывают, что модель Jr (пиковые уровни) обеспечивает лучший коэффициент усредненного усиления по сравнению с моделью Рекомендации МСЭ-R F.699, и, аналогично, модель Ja (усредненные уровни) обеспечивает лучший коэффициент усредненного усиления по сравнению с моделями усредненного усиления Рекомендаций МСЭ-R F.1245 и МСЭ-R RA.1631 на всех частотах.

На рисунке 11 (а, б) представлены соответствующие графики для антенны диаметром 70 м (характеризующейся среднеквадратическим значением погрешности поверхности 0,60 мм) по всему диапазону частот от 1 до 35 ГГц. Как видно на рисунках, для антенны диаметром 70 м для сети исследования дальнего космоса, работающей на частоте 32 ГГц, коэффициент усредненного усиления несколько выше, чем полученный при использовании других моделей, что объясняется режимами работы этой антенны на очень высоких частотах и предпринимаемой данной моделью попыткой обеспечить хорошее совпадение с более высокими боковыми лепестками диаграммы направленности, чего другие модели не делают. При необходимости использовать эту антенну на таких высоких частотах следует улучшить допуск на погрешности поверхности.

Сравнение с теоретическими диаграммами направленности излучения при разных значениях длины корреляции погрешностей поверхности

На рисунке 12 (а, б, в) включены теоретические диаграммы направленности круговой апертуры, рассчитанные с использованием аппроксимации по лямбда-функции (нормализованной функции Бесселя) для диаграммы направленности, которая также включает влияние допуска на погрешность поверхности с использованием формул Руза [Ruze, 1966]. Включены несколько теоретических диаграмм направленности, соответствующих различным значениям "длины корреляции" для погрешностей поверхности. Эти численные результаты, рассчитанные для D/λ при 4000, показывают, что модели J_p и J_a обеспечивают лучшую огибающую, чем модель Рекомендации МСЭ-R F.699-7. В расчетных теоретических диаграммах направленности используются коэффициент затенения, равный 0,1; распределение поля по апертуре по форме $E = (1 - c) + c(1 - r^2)^n$ с распределением поля по краю $ET = 10$ дБ; $c = 1 - 10^{(-ET/20)}$ и коэффициент уклона $n = 1$.

На рисунке 12а сравниваются диаграммы направленности антенны "хорошего" качества со среднеквадратическим значением погрешности поверхности, составляющим $(1/15)\lambda$. Модель J_p близка к верхней огибающей всех теоретических кривых, соответствующих различным допущениям на длину корреляции. Модель огибающей пиковых уровней Рекомендации МСЭ-R F.699-7, однако, значительно превышает теоретические кривые усиления для нескольких случаев длины корреляции при углах смещения более 1° . Превышение также происходит в ряде случаев при углах смещения между $0,05^\circ$ и $0,1^\circ$. Модели "усредненного усиления", Рекомендации МСЭ-R F.1245 и МСЭ-R RA.1631, превышаются теоретическими еще в большей степени, как и ожидалось.

На рисунке 12б показано сравнение для антенны со "средним" допуском на погрешность поверхности. По рисунку видно, что разница уменьшается и обе модели – J_p и Рекомендации МСЭ-R F.699-7 – являются достоверными верхними огибающими, за исключением малых нарушений в худшем случае. Модель Рекомендации МСЭ-R F.699 начинает превышать модель J_p при углах между $0,1^\circ$ и 10° .

На рисунке 12в для случая допуска на погрешность поверхности антенны "хорошего" качества видно, что модель J_p остается достоверной верхней огибающей относительно теоретических кривых усиления во всех случаях, кроме худшего, длины корреляции погрешности поверхности. Модель Рекомендации МСЭ-R F.699 превышает модель J_p примерно на 5 дБ при углах между $0,1^\circ$ и 30° . Даже модели усредненного усиления, Рекомендации МСЭ-R F.1245 и МСЭ-R RA.1631, превышают J_a примерно на 2 дБ.

4 Модель усредненного усиления

Модель усредненного усиления, базирующаяся на модели J_a

В угловых диапазонах между $0,1^\circ$ и 50° диаграмма направленности излучения антенны испытывает периодические колебания, как показано на теоретических диаграммах направленности, обсуждаемых выше. Огибающая пиковых уровней в этом диапазоне дает завышенную оценку усиления антенны на многих углах. При проведении исследований совместимости, включающих большое число источников помех, которые распределены по всем углам в этом диапазоне, желательно уменьшить показываемое огибающей усиление, с тем чтобы минимизировать смещение в оценке совокупных помех. Как указано в п. 2, случай е), усредненное значение в этом диапазоне может рассматриваться как значение, приблизительно на 3 дБ меньше пиковых уровней колебаний.

Поскольку диаграмма направленности излучения конкретной антенны земной станции неизвестна и поскольку модель огибающей пиковых уровней, такая как J_p , является близкой к минимальной огибающей антенн рассматриваемого класса, целесообразно уменьшить в указанном диапазоне уровни усиления модели J_p на 3 дБ и полученный результат использовать в данном диапазоне как "усредненную диаграмму направленности". Эта "усредненная диаграмма направленности" по-прежнему будет на определенных углах выше усредненных уровней усиления фактической диаграммы направленности излучения, если таковая известна.

Данная "усредненная диаграмма направленности", полученная на базе модели J_p , включена в сравнение на рисунках 1–12.

Отклонение усиления от усредненной диаграммы направленности

Уменьшение на 3 дБ в диапазоне между $0,1^\circ$ и 50° может применяться как мера уровня неопределенности или допуск на диаграмму направленности антенны, применяемая в статистическом моделировании по методу Монте-Карло. Не имея данных о распределении данного класса антенн, предлагается рассматривать отклонение от усредненного усиления соответствующим гауссовому, где значение $3\text{-}\sigma$ равняется 3 дБ.

5 Выводы

Предлагается математическая модель усиления, J_p , представляющая огибающую для класса антенн с большой апертурой, которые в настоящее время используются на земных станциях СКИ. В модели учитывается воздействие допуска на погрешности поверхности на распределение усиления в главном луче и в боковых лепестках. Модель включает коэффициент использования поверхности апертуры с учетом его влияния как на область пиков, так и на область боковых лепестков. Было показано, что модель по своим качествам превосходит существующие модели во многих аспектах.

Также предлагается модель “усредненного усиления”, J_a , позволяющая провести более точную оценку совокупных помех, создаваемых большим числом распределенных источников помех, методом статистического моделирования (метод Монте-Карло). Также для использования при моделировании представлена простая модель, описывающая неопределенное отклонение от диаграммы направленности.

Для типовых антенн диаметром 34 м или 70 м, используемых в исследованиях дальнего космоса и работающих в полосе частот 2,3 ГГц или 8,4 ГГц, модель J_p (пиковые уровни) обеспечивает более точную огибающую по сравнению с моделью огибающей, представленной в Рекомендации МСЭ-R F.699-7, и лучший коэффициент усредненного усиления, а модель J_a (усредненные уровни) обеспечивает более точную аппроксимацию и лучший коэффициент усредненного усиления по сравнению с моделями усредненного усиления, содержащимися в Рекомендациях МСЭ-R F.1245 и МСЭ-R RA.1631. Для антенны диаметром 34 м, работающей в полосе частот 32 ГГц или 37 ГГц, вышеизложенное также справедливо.

Принимая во внимание все отклонения и неопределенности диаграмм направленности излучения разных антенн и тот факт, что предложенная модель J_p ближе к верхней огибающей, базирующейся на физических принципах, эта модель должна использоваться во всех исследованиях вопросов совместимости и совместного использования частот, проводимых с одной определенной диаграммой направленности антенны. Модель усредненного усиления, J_a , должна использоваться только в случае наличия большого числа распределенных источников помех, находящихся в широком диапазоне углов относительно линии прицеливания.

6 Справочные документы

JAMNEJAD, V. [March 8-13, 2003] Simple gain probability functions for large reflector antennas of JPL/NASA. IEEE Aerospace Conference, Big Sky, Montana.

RUZE, J. [April 1966] Antenna tolerance theory-A review. *Proc. IEEE*, Vol. 54, p. 633-640.

РИСУНОК 1а

Сравнение моделей диаграммы направленности антенны для антенн диаметром $D = 1000 \lambda$.
 Модели Jp и Ja используются для антенн "плохого" качества с погрешностью поверхности $h_{rms} = (1/15) \lambda$
 (Ось линейного угла)

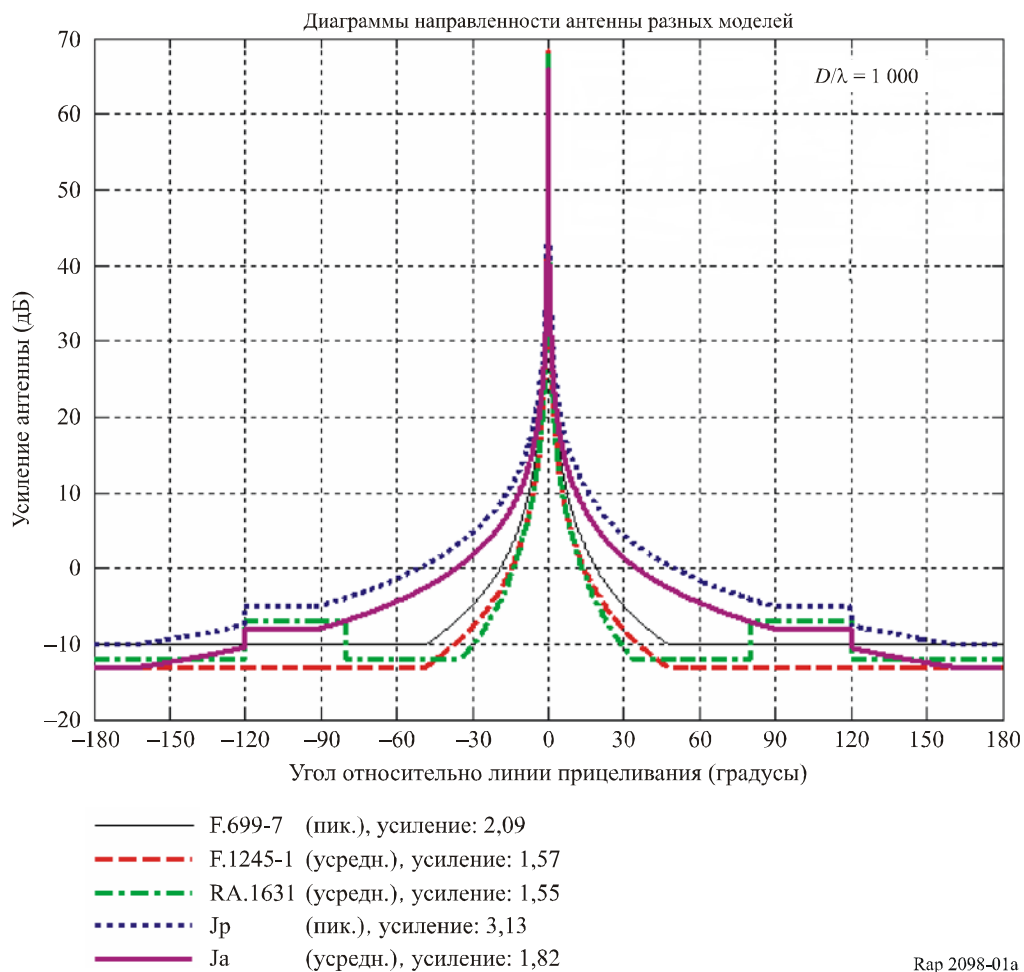
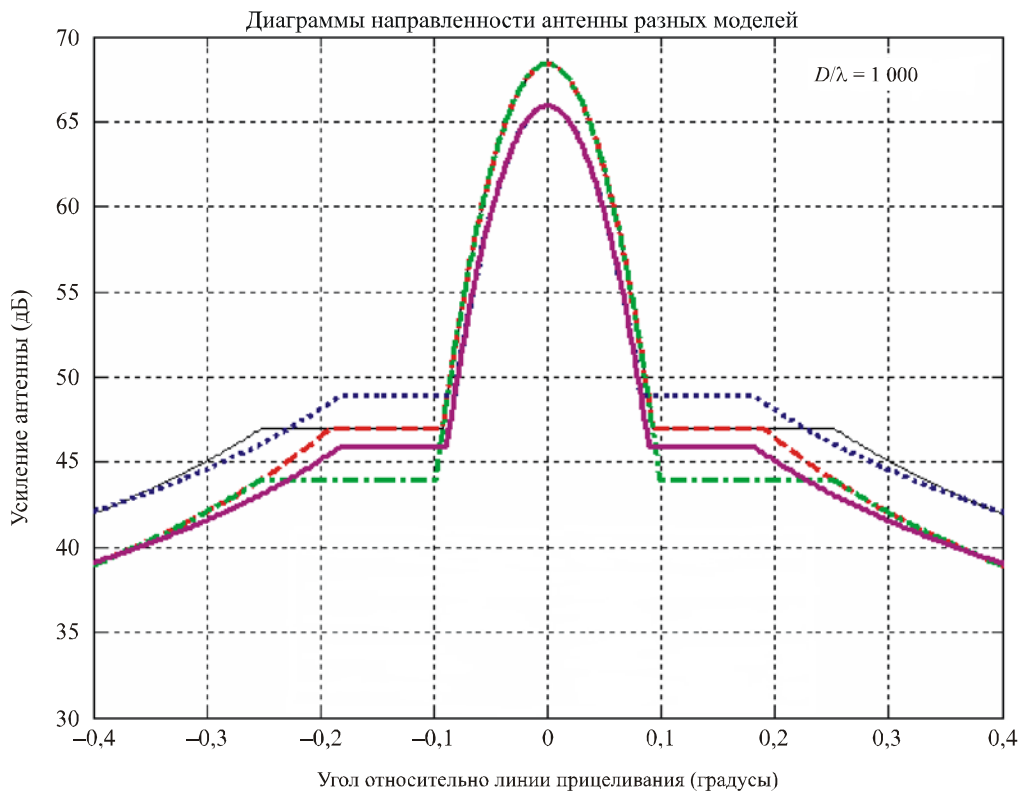


РИСУНОК 1б

Сравнение моделей диаграммы направленности антенны для антенн диаметром $D = 1000 \lambda$.
 Модели Jr и Ja используются для антенн "плохого" качества с погрешностью поверхности $h_{rms} = (1/15) \lambda$
 (Ось расширенного линейного угла)



F.699-7 (пик.), усиление: 2,09
 F.1245-1 (усредн.), усиление: 1,57
 RA.1631 (усредн.), усиление: 1,55
 Jr (пик.), усиление: 3,13
 Ja (усредн.), усиление: 1,82

Rap 2098-01b

РИСУНОК 1с

Сравнение моделей диаграммы направленности антенны для антенн диаметром $D = 1000 \lambda$.
 Модели Jp и Ja используются для антенн "плохого" качества с погрешностью поверхности $h_{rms} = (1/15) \lambda$
 (Ось логарифмического угла)

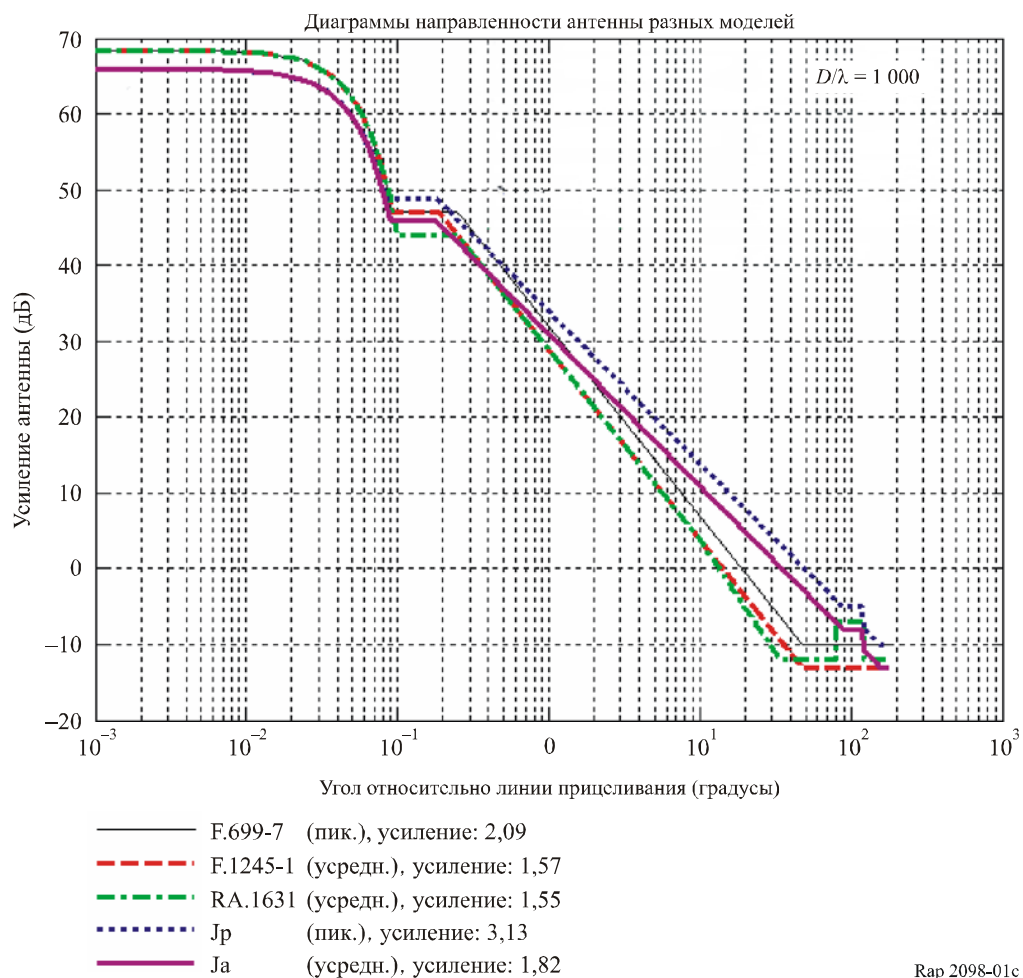


РИСУНОК 2а

Сравнение моделей диаграммы направленности антенны для антенн диаметром $D = 1000 \lambda$.
 Модели Jr и Ja используются для антенн "среднего" качества с погрешностью поверхности $h_{rms} = (1/30) \lambda$
 (Ось линейного угла)

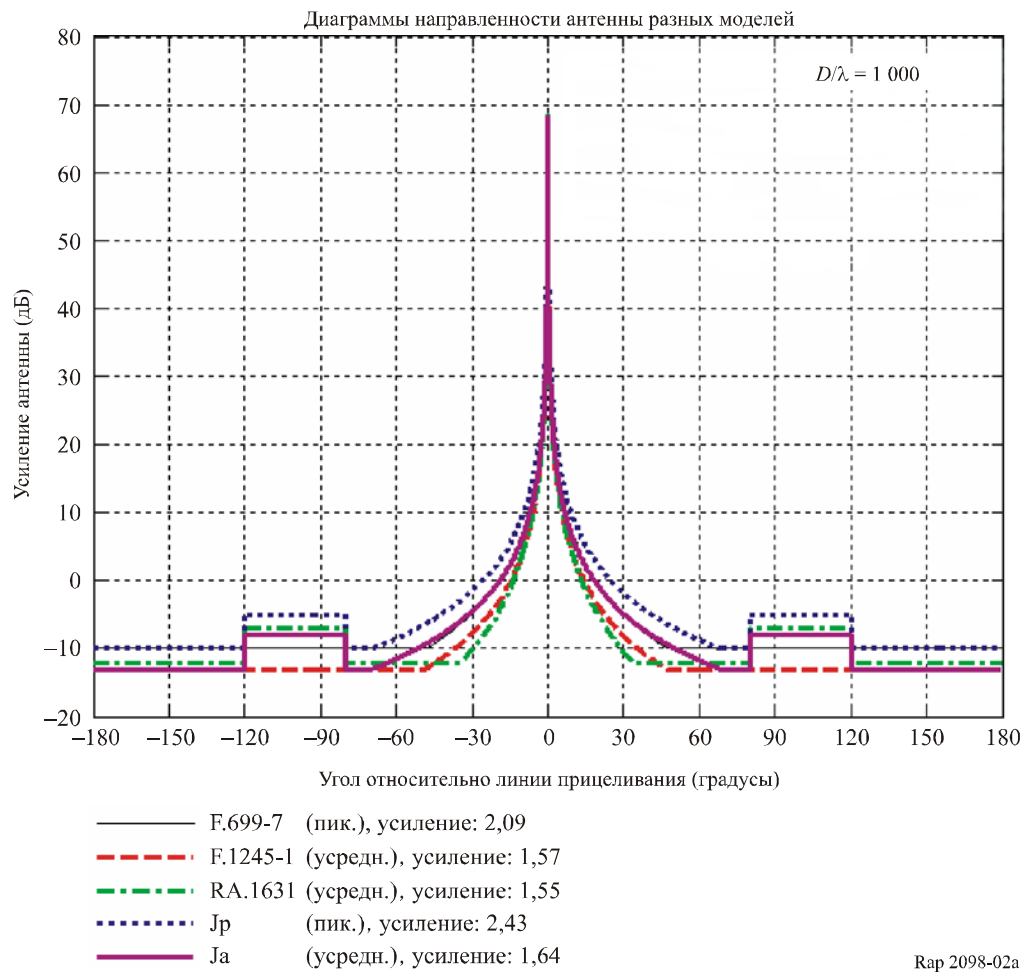


РИСУНОК 2б

Сравнение моделей диаграммы направленности антенны для антенн диаметром $D = 1000 \lambda$.
 Модели Jp и Ja используются для антенн "среднего" качества с погрешностью поверхности $h_{rms} = (1/30) \lambda$
 (Ось расширенного линейного угла)

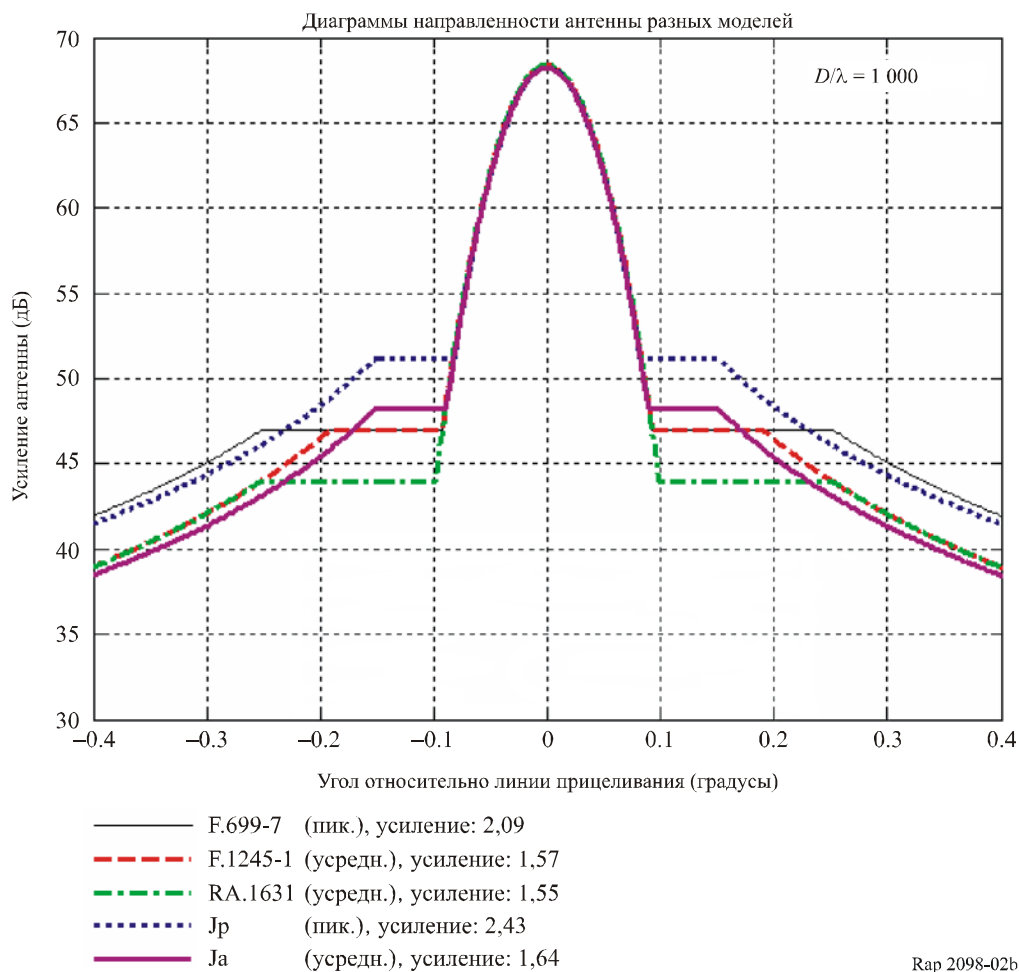


РИСУНОК 2с

Сравнение моделей диаграммы направленности антенны для антенн диаметром $D = 1000 \lambda$.
 Модели Jp и Ja используются для антенн "среднего" качества с погрешностью поверхности $h_{rms} = (1/30) \lambda$
 (Ось логарифмического угла)

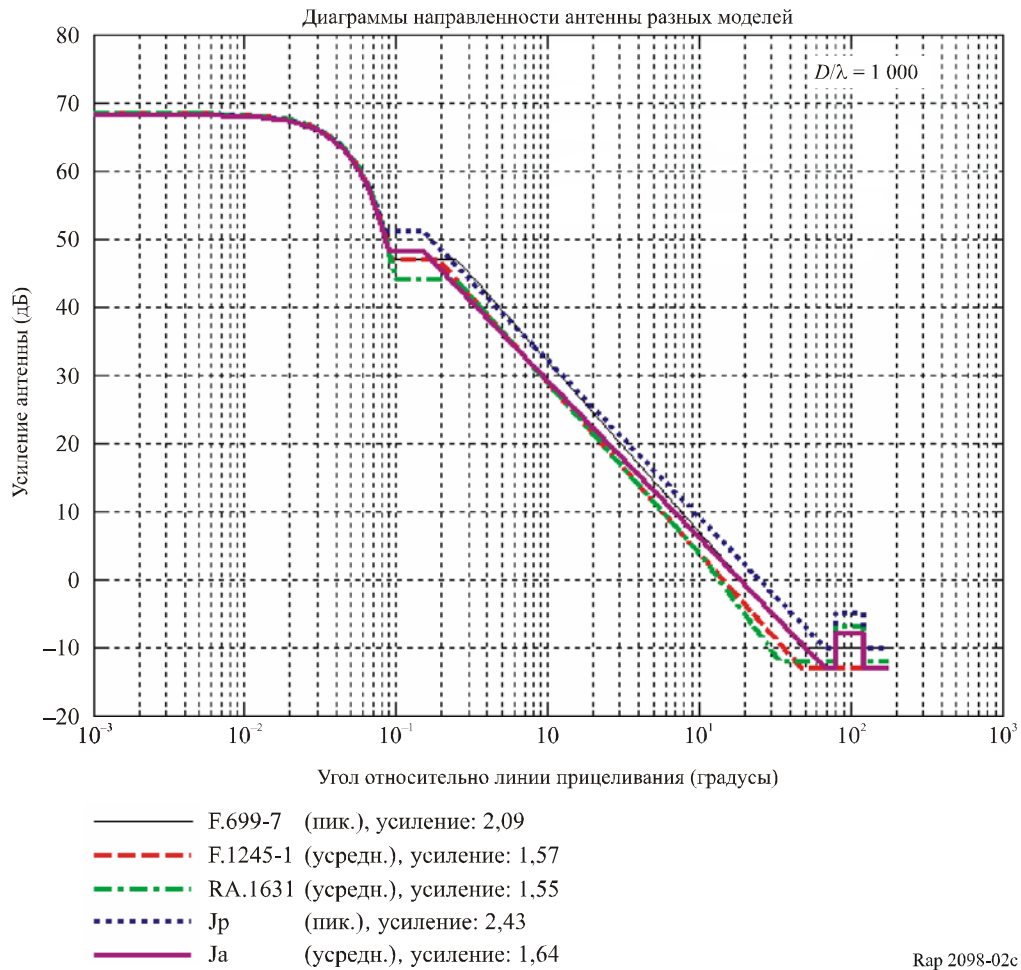


РИСУНОК 3а

Сравнение моделей диаграммы направленности антенны для антенн диаметром $D = 1000 \lambda$.
 Модели Jp и Ja используются для антенн "хорошего" качества с погрешностью поверхности, $h_{rms} = (1/60) \lambda$
 (Ось линейного угла)

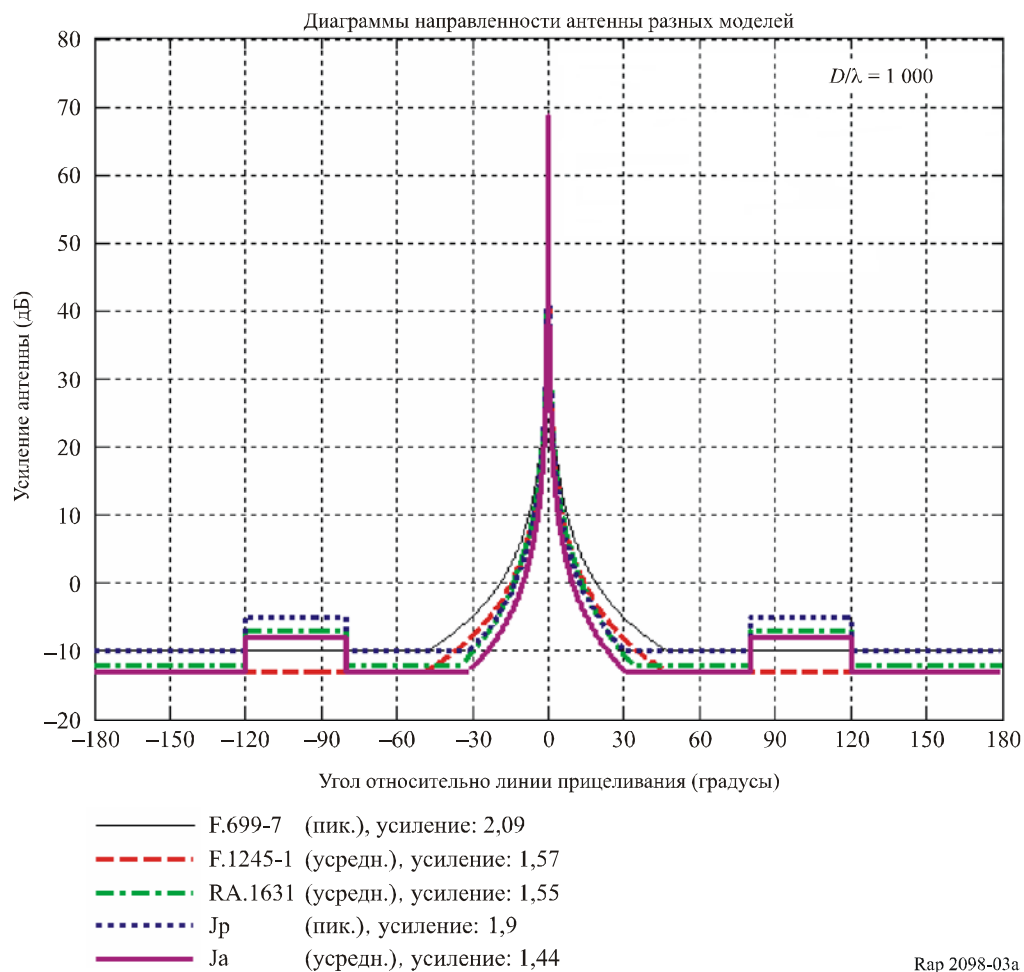


РИСУНОК 3б

Сравнение моделей диаграммы направленности антенны для антенн диаметром $D = 1000 \lambda$.
 Модели Jp и Ja используются для антенн "хорошего" качества с погрешностью поверхности, $h_{rms} = (1/60) \lambda$
 (Ось расширенного линейного угла)

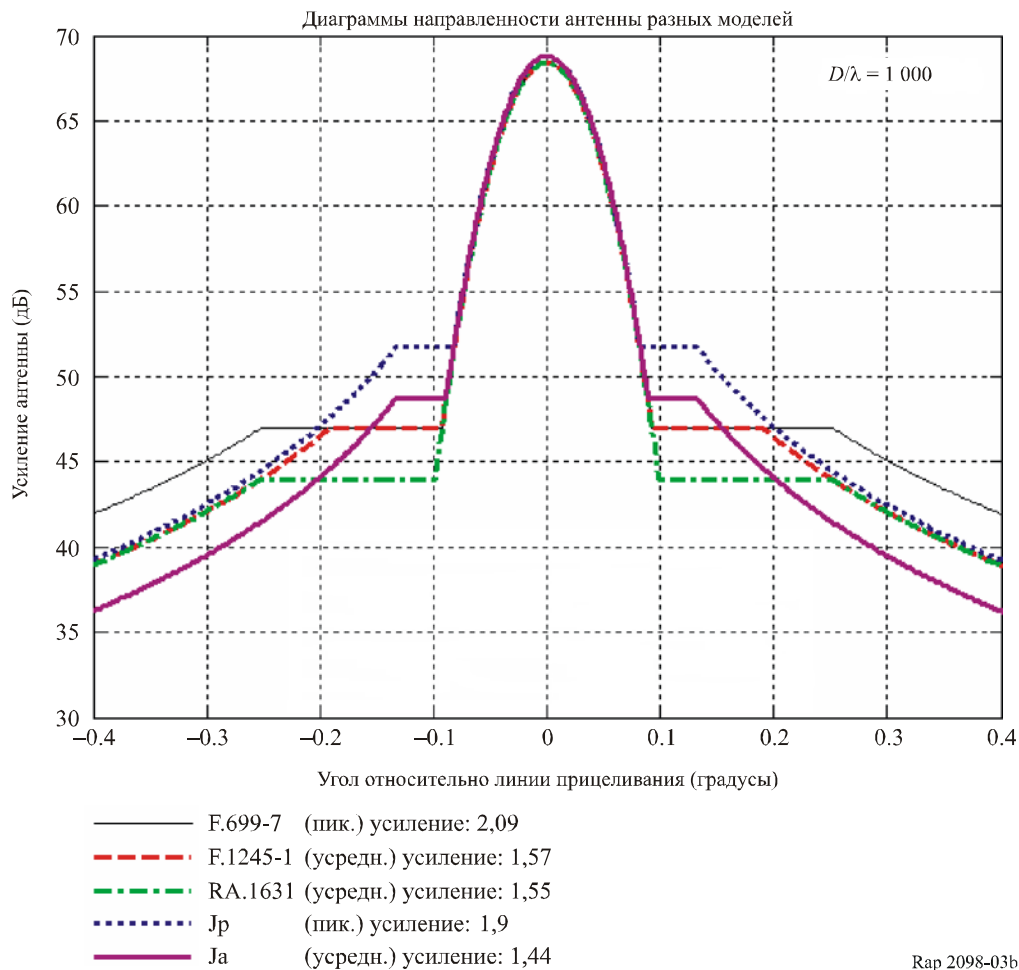


РИСУНОК 3с

Сравнение моделей диаграммы направленности антенны для антенн диаметром $D = 1000 \lambda$.
 Модели Jp и Ja используются для антенн "хорошего" качества с погрешностью поверхности, $h_{rms} = (1/60) \lambda$
 (Ось логарифмического угла)

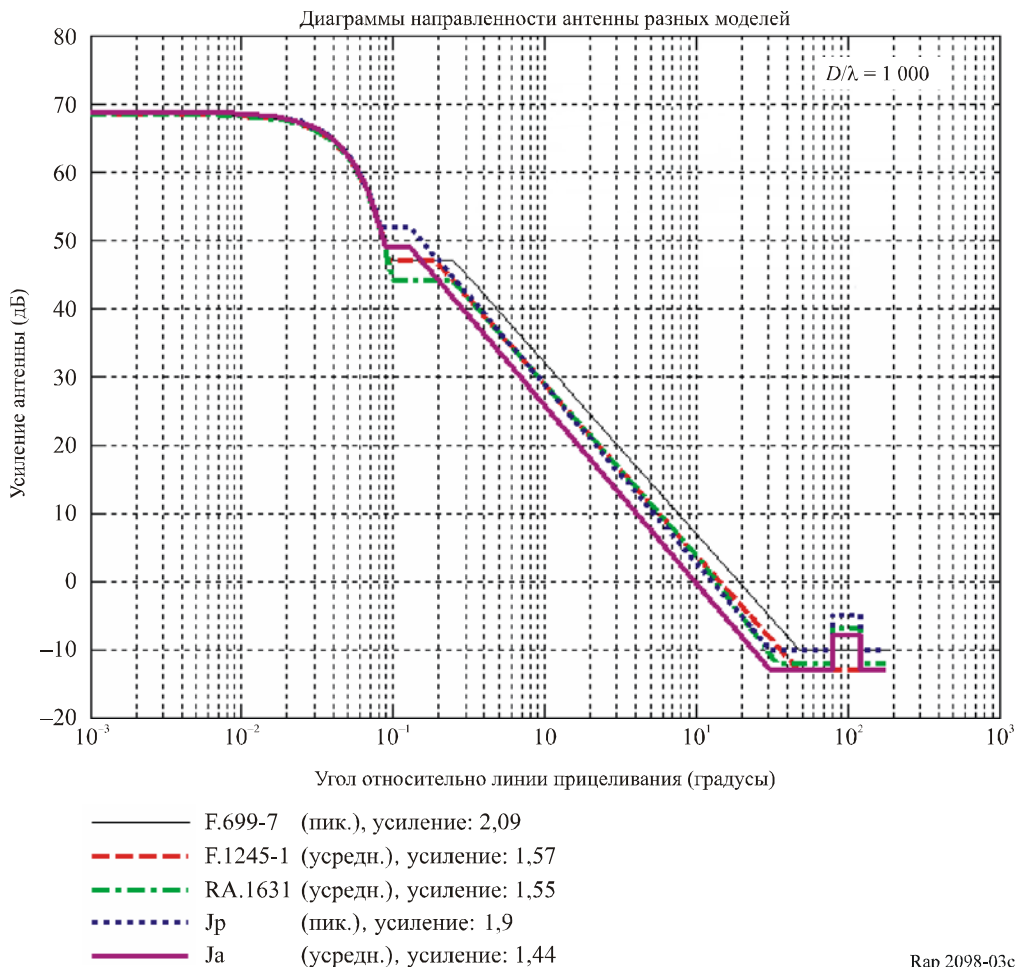


РИСУНОК 4а

Сравнение моделей диаграммы направленности антенны для антенн диаметром $D = 4000 \lambda$.
 Модели Jp и Ja используются для антенн "плохого" качества с погрешностью поверхности $h_{rms} = (1/15) \lambda$
 (Ось линейного угла)

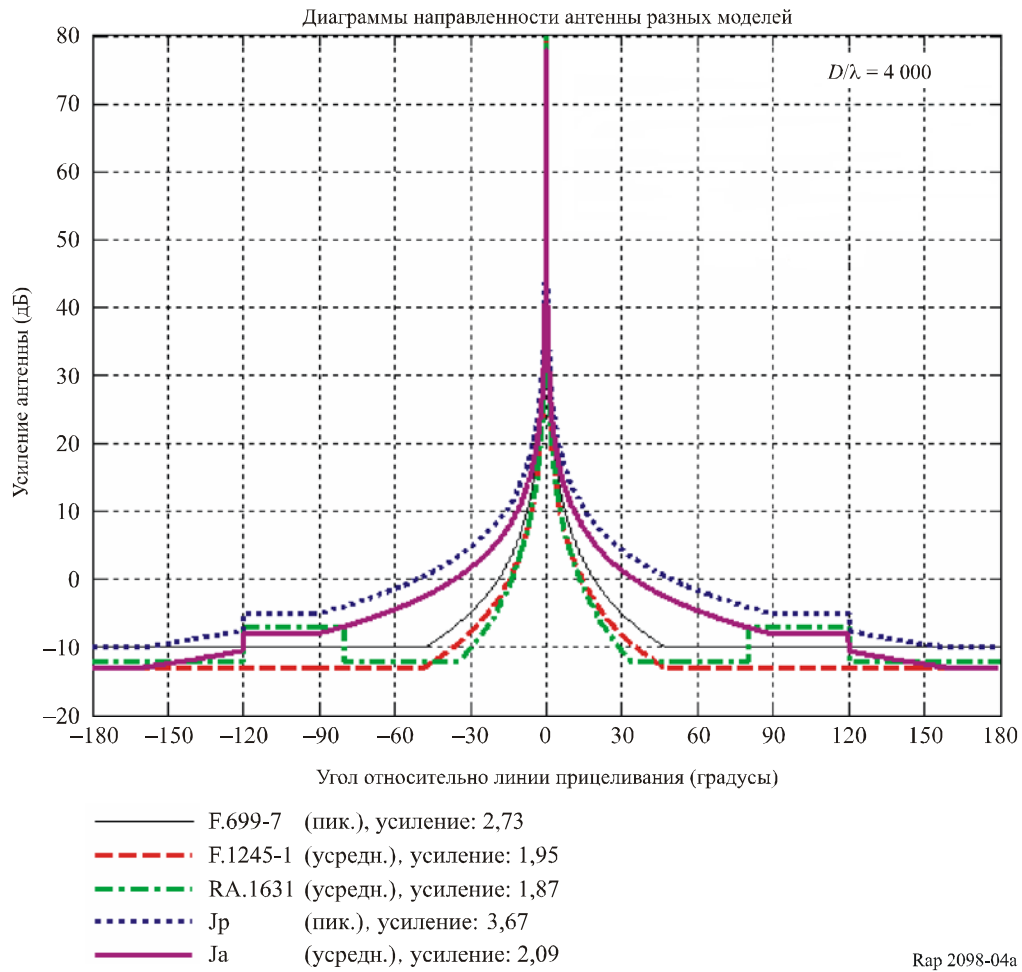


РИСУНОК 4б

Сравнение моделей диаграммы направленности антенны для антенн диаметром $D = 4000 \lambda$.
 Модели Jp и Ja используются для антенн "плохого" качества с погрешностью поверхности $h_{rms} = (1/15) \lambda$
 (Ось расширенного линейного угла)

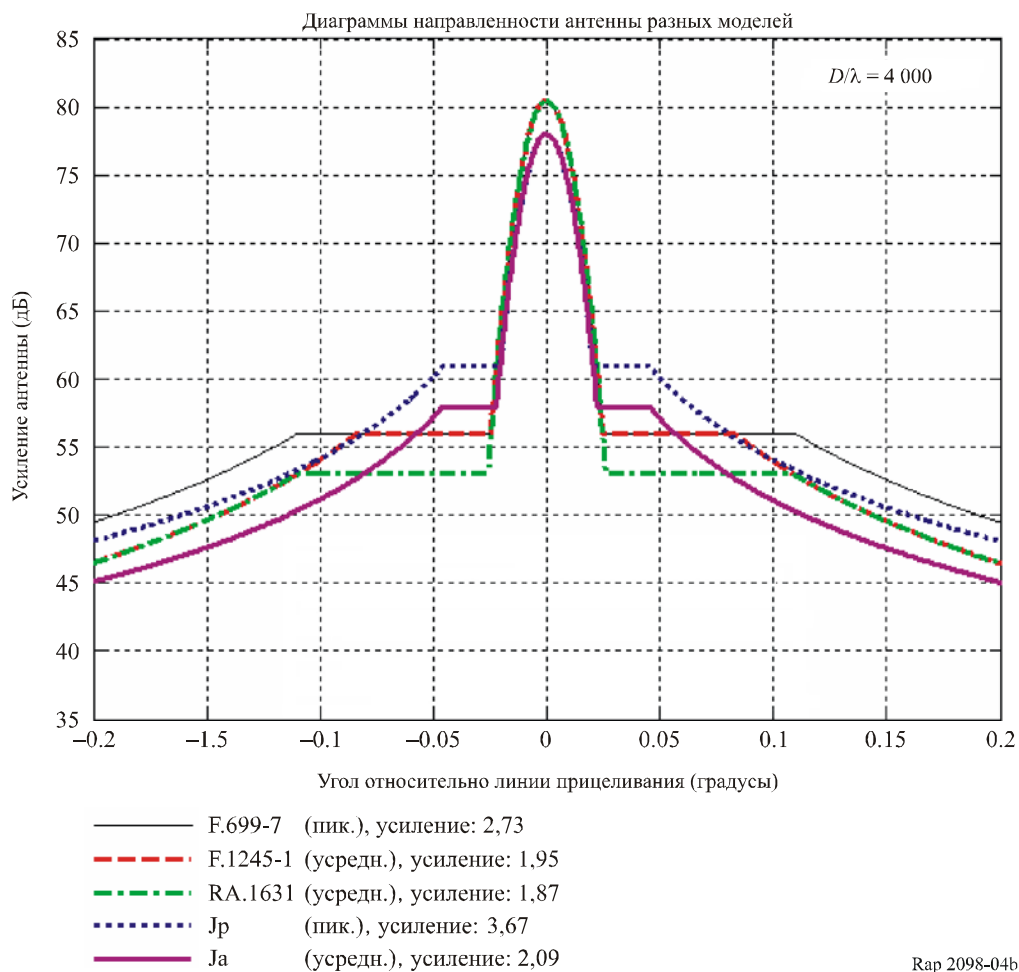


РИСУНОК 4с

Сравнение моделей диаграммы направленности антенны для антенн диаметром $D = 4000 \lambda$.
 Модели Jp и Ja используются для антенн "плохого" качества с погрешностью поверхности $h_{rms} = (1/15) \lambda$
 (Ось логарифмического угла)

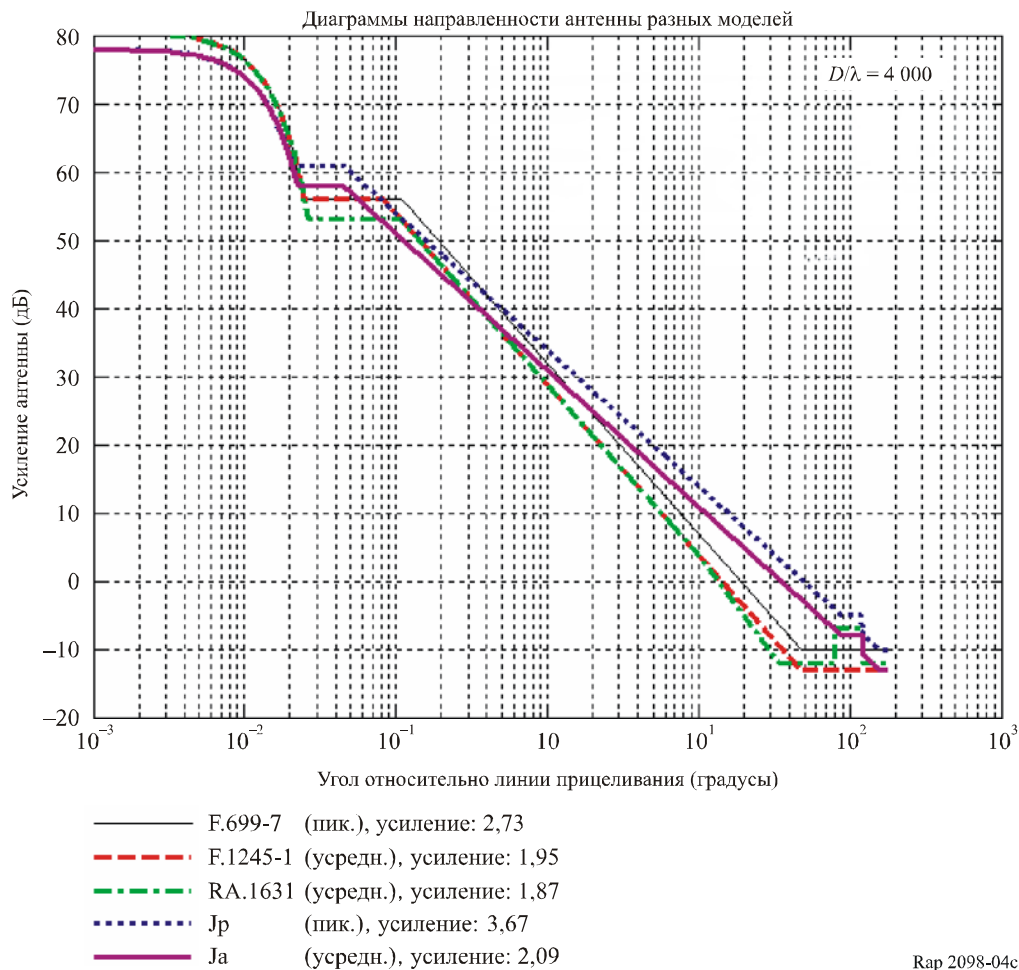


РИСУНОК 5а

Сравнение моделей диаграммы направленности антенны для антенн диаметром $D = 4000 \lambda$.
 Модели Jp и Ja используются для антенн "среднего" качества с погрешностью поверхности $h_{rms} = (1/30) \lambda$
 (Ось линейного угла)

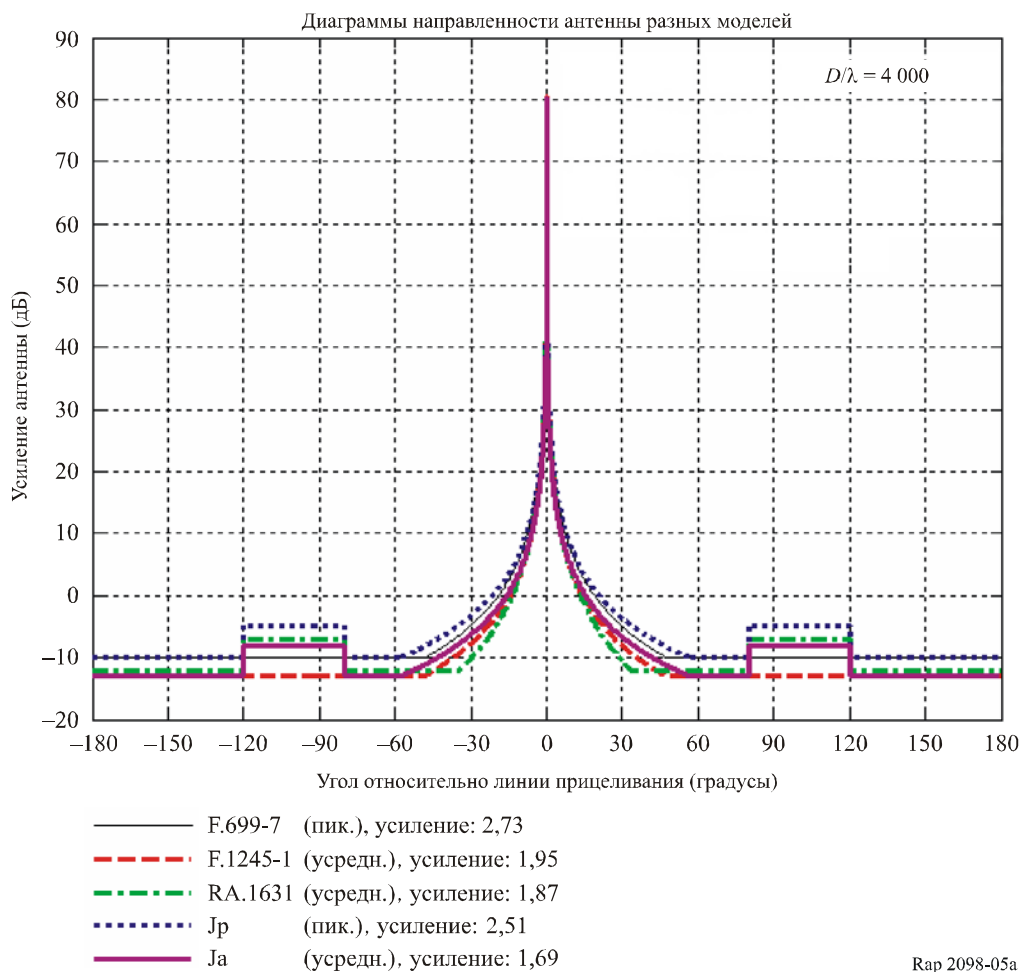


РИСУНОК 5b

Сравнение моделей диаграммы направленности антенны для антенн диаметром $D = 4000 \lambda$.
 Модели Jp и Ja используются для антенн "среднего" качества с погрешностью поверхности $h_{rms} = (1/30) \lambda$
 (Ось расширенного линейного угла)

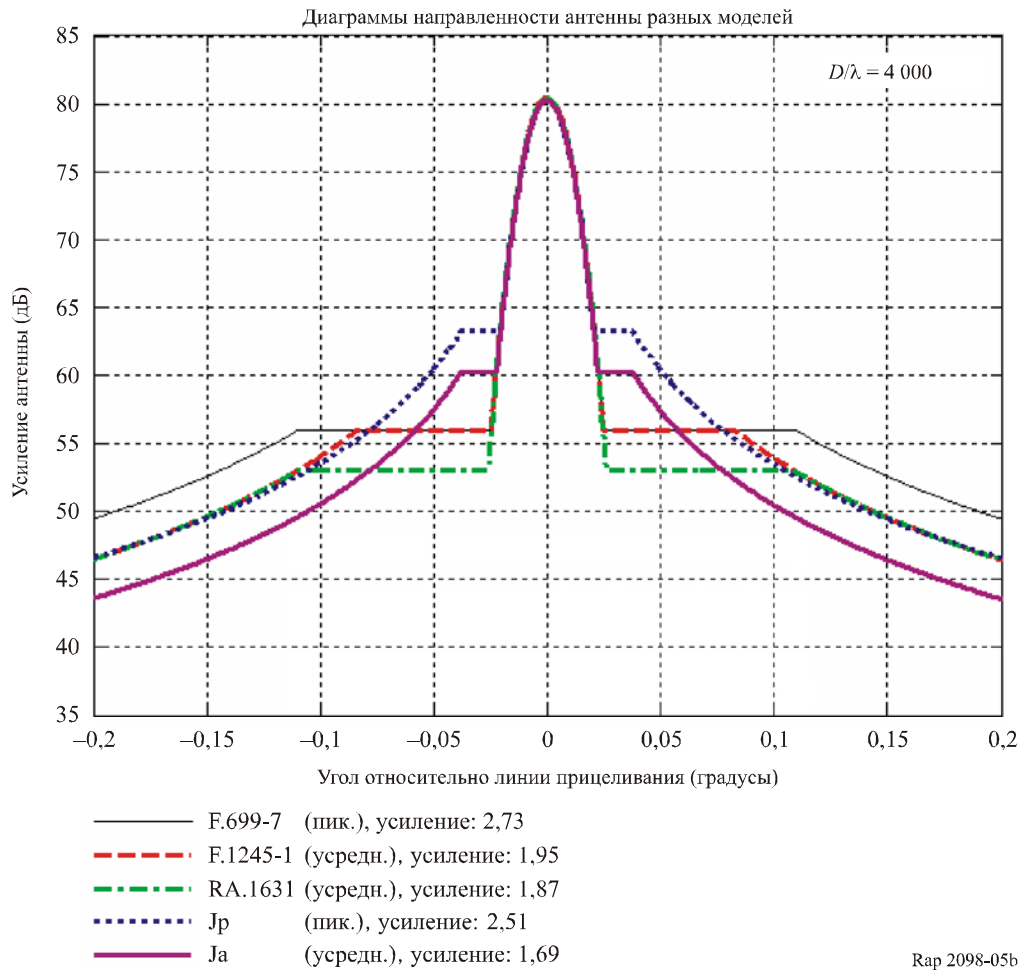


РИСУНОК 5с

Сравнение моделей диаграммы направленности антенны для антенн диаметром $D = 4000 \lambda$.
 Модели Jp и Ja используются для антенн "среднего" качества с погрешностью поверхности $h_{rms} = (1/30) \lambda$
 (Ось логарифмического угла)

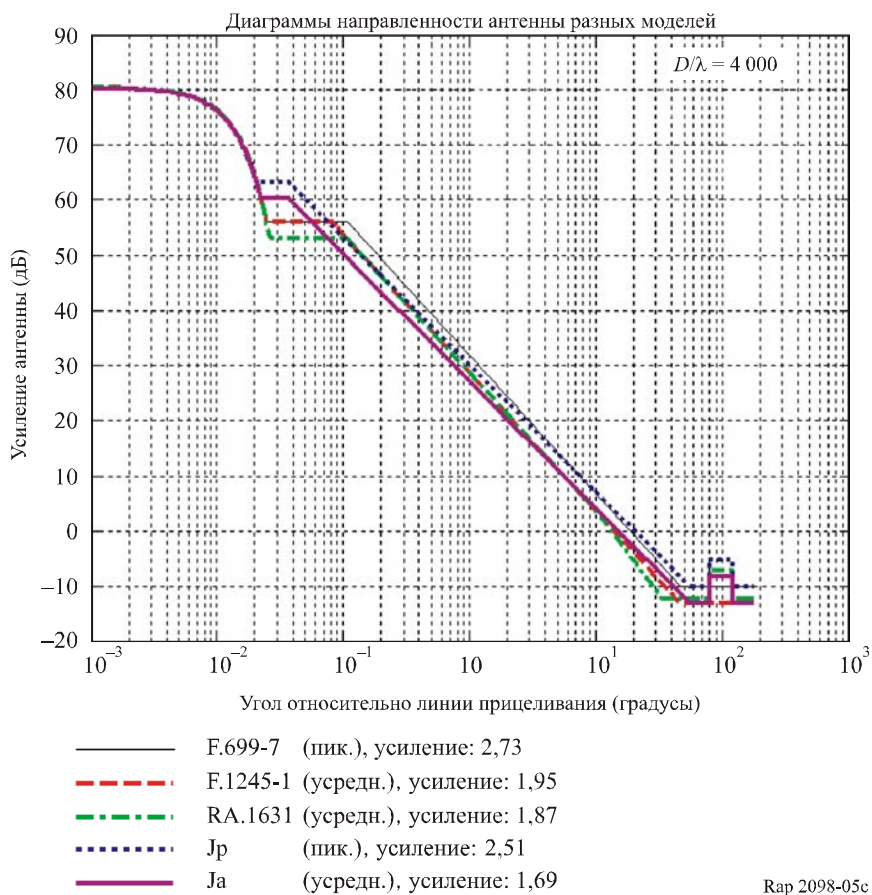


РИСУНОК 6а

Сравнение моделей диаграммы направленности антенны для антенн диаметром $D = 4000 \lambda$.
 Модели Jr и Ja используются для антенн "хорошего" качества с погрешностью поверхности, $h_{rms} = (1/60) \lambda$
 (Ось линейного угла)

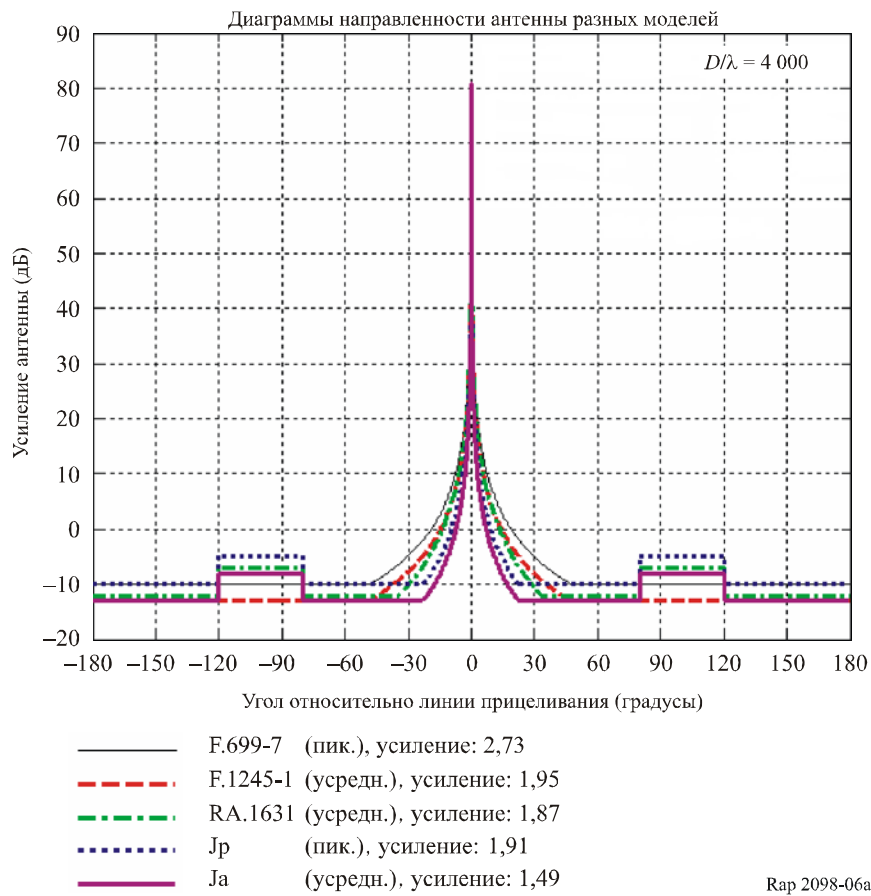


РИСУНОК 6б

Сравнение моделей диаграммы направленности антенны для антенн диаметром $D = 4000 \lambda$.
 Модели Jr и Ja используются для антенн "хорошего" качества с погрешностью поверхности, $h_{rms} = (1/60) \lambda$
 (Ось расширенного линейного угла)

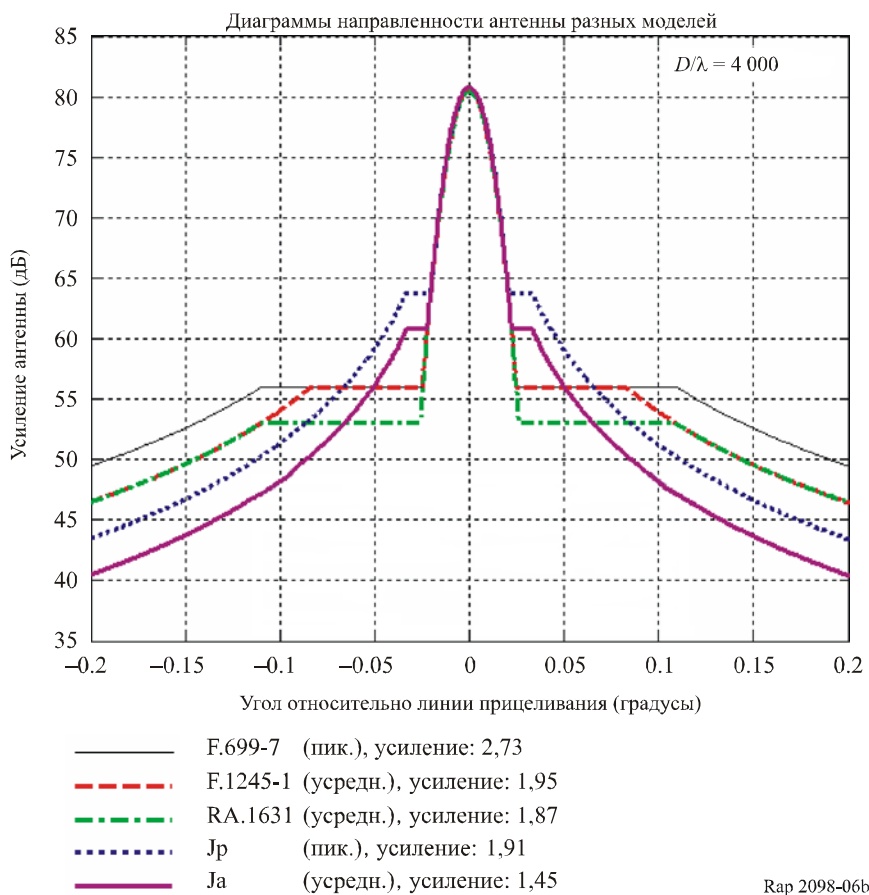


РИСУНОК 6с

Сравнение моделей диаграммы направленности антенны для антенн диаметром $D = 4000 \lambda$.
 Модели Jp и Ja используются для антенн "хорошего" качества с погрешностью поверхности, $h_{rms} = (1/60) \lambda$
 (Ось логарифмического угла)

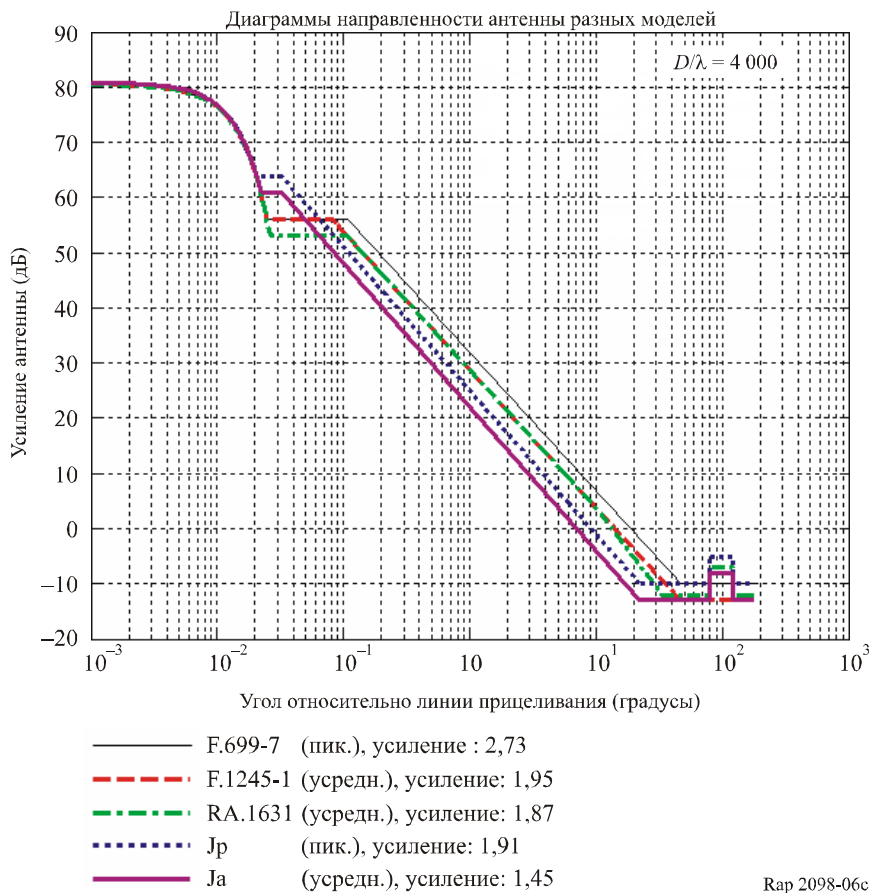


РИСУНОК 7а

Сравнение усредненного усиления разных моделей, модели Jp и Ja используются для антенн "плохого" качества с погрешностью поверхности $h_{rms} = (1/15) \lambda$ (Усредненное усиление (дБ))

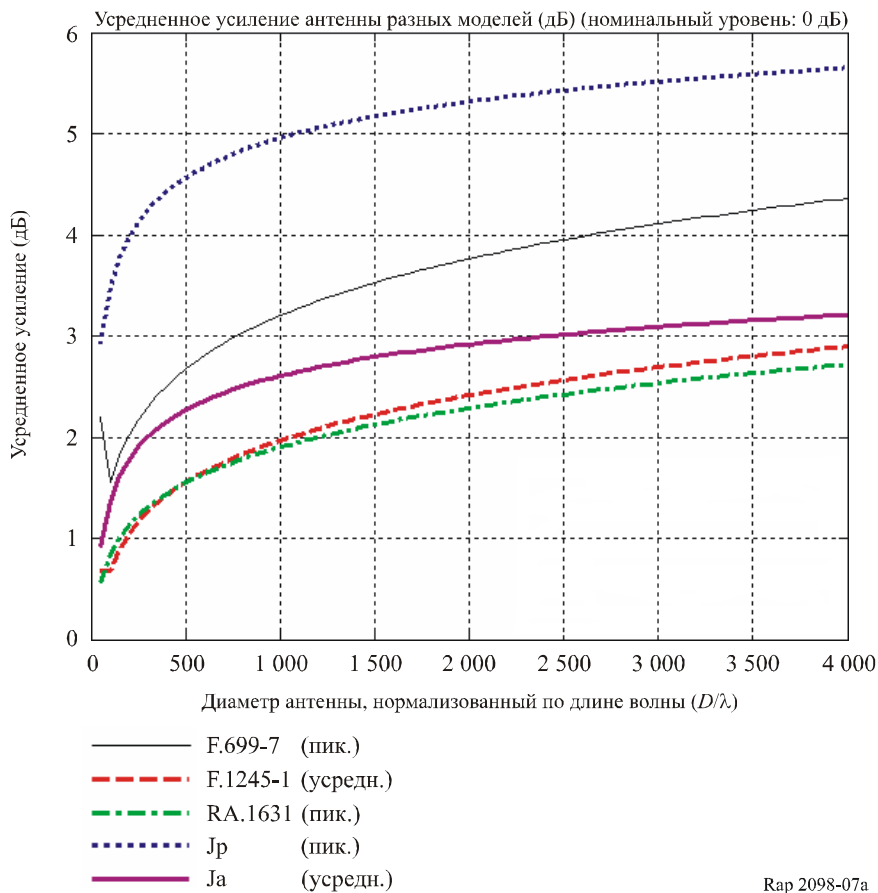
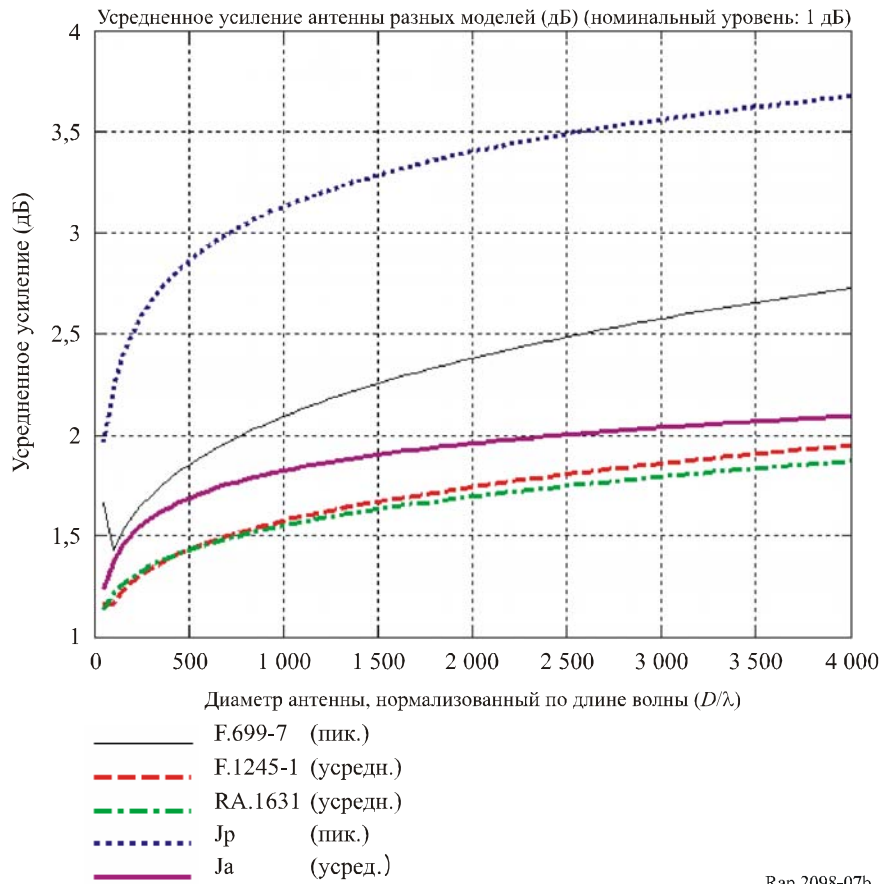


РИСУНОК 7б

Сравнение усредненного усиления разных моделей, модели Jr и Ja используются для антенн "плохого" качества с погрешностью поверхности $h_{rms} = (1/15) \lambda$ (Линейное усредненное усиление)



Rap 2098-07b

РИСУНОК 8а

Сравнение усредненного усиления разных моделей, модели Jp и Ja используются для антенн "среднего" качества с погрешностью поверхности $h_{rms} = (1/30) \lambda$ (Усредненное усиление (дБ))

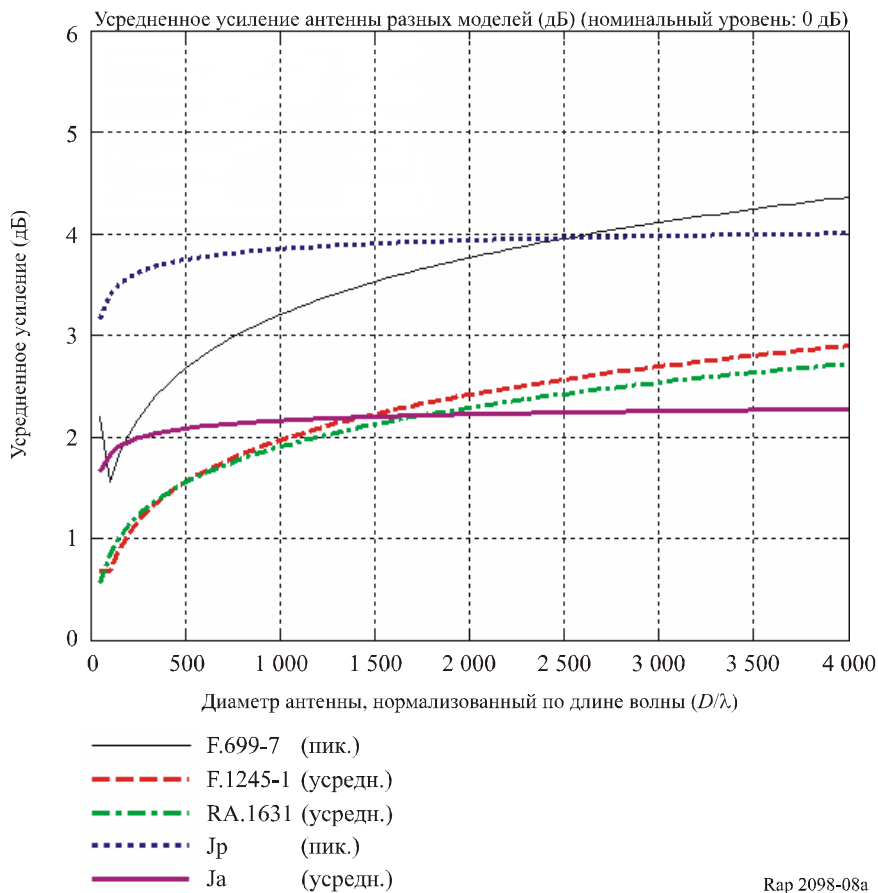


РИСУНОК 8б

Сравнение усредненного усиления разных моделей, модели Jp и Ja используются для антенн "среднего" качества с погрешностью поверхности $h_{rms} = (1/30) \lambda$ (Линейное усредненное усиление)

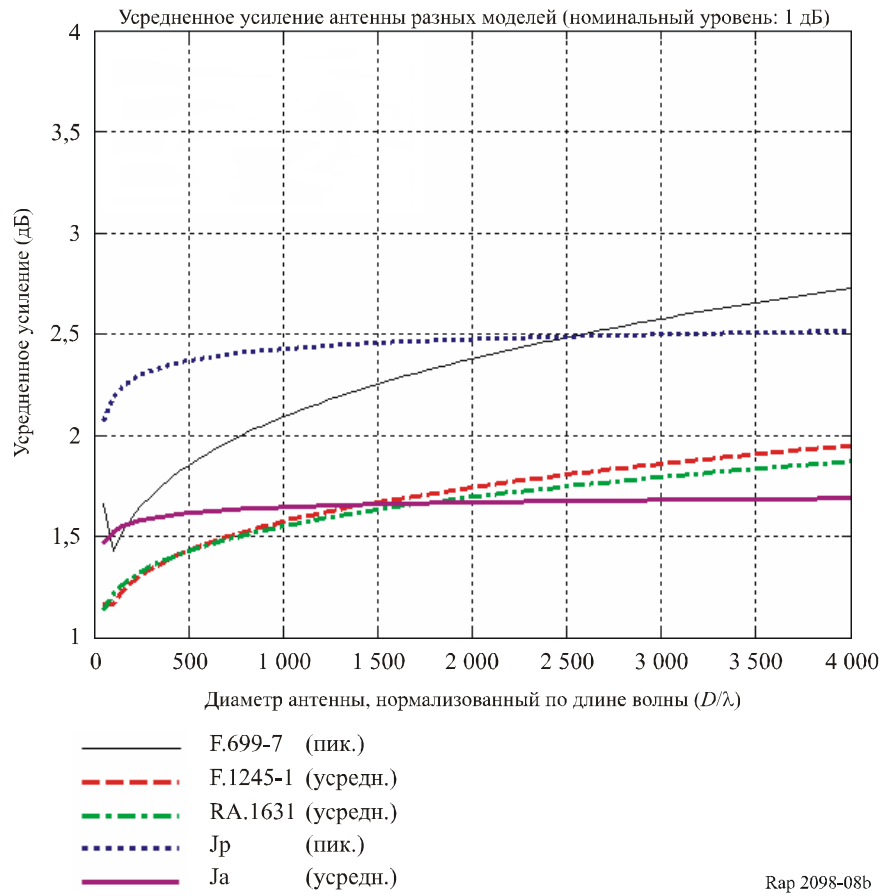


РИСУНОК 9а

Сравнение усредненного усиления разных моделей, модели Jp и Ja используются для антенн "хорошего" качества с погрешностью поверхности $h_{rms} = (1/60) \lambda$ (Усредненное усиление (дБ))

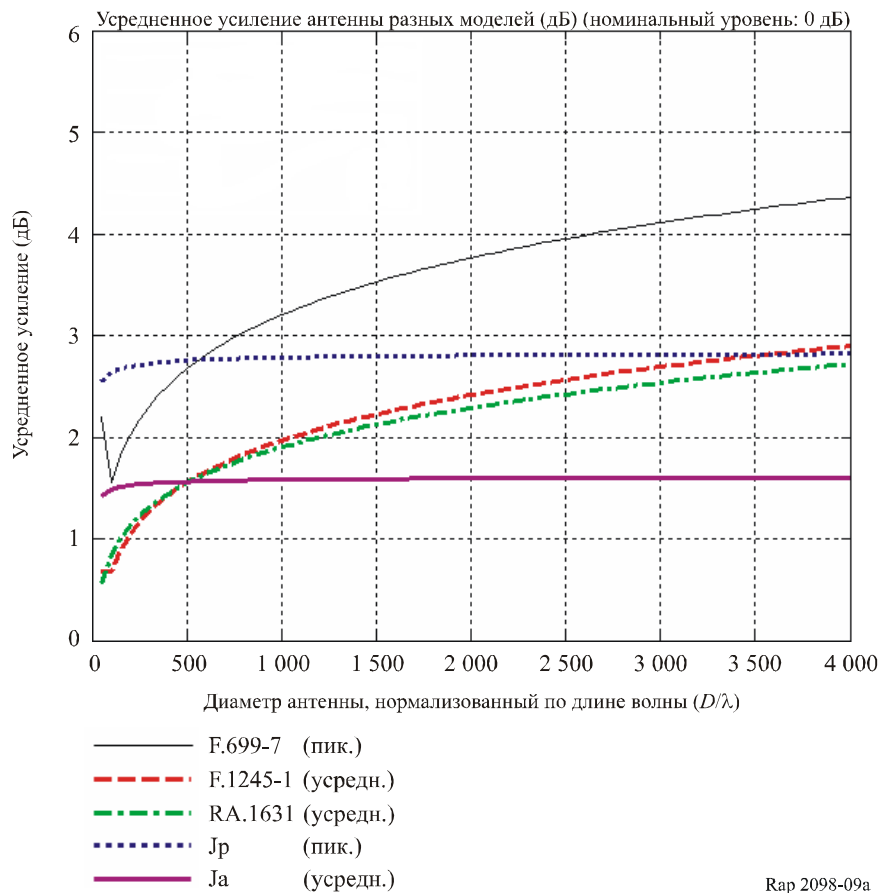


РИСУНОК 9б

Сравнение усредненного усиления разных моделей, модели J_p и J_a используются для антенн "хорошего" качества с погрешностью поверхности $h_{rms} = (1/60) \lambda$ (Линейное усредненное усиление)

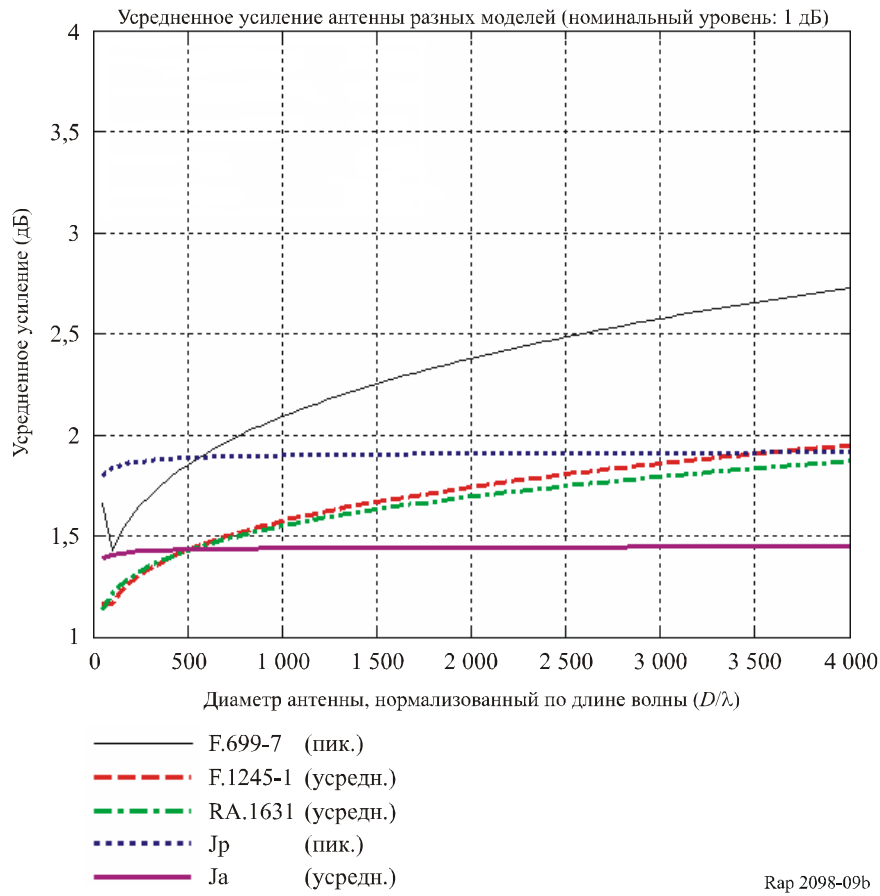


РИСУНОК 10а

Сравнение усредненного усиления разных моделей, модели Jr и Ja используются для антенны диаметром 34 м с погрешностью поверхности $h_{rms} = 0,25$ мм (Усредненное усиление (дБ))

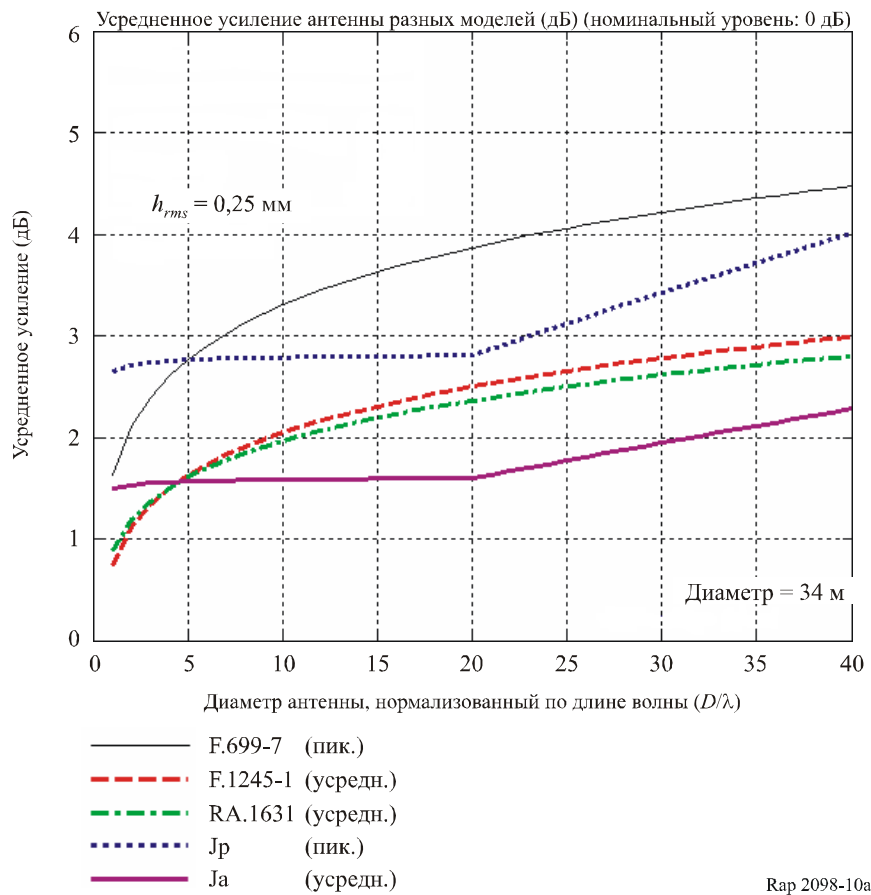


РИСУНОК 10b

Сравнение усредненного усиления разных моделей, модели Jp и Ja используются для антенны диаметром 34 м с погрешностью поверхности $h_{rms} = 0,25$ мм (Линейное усредненное усиление)

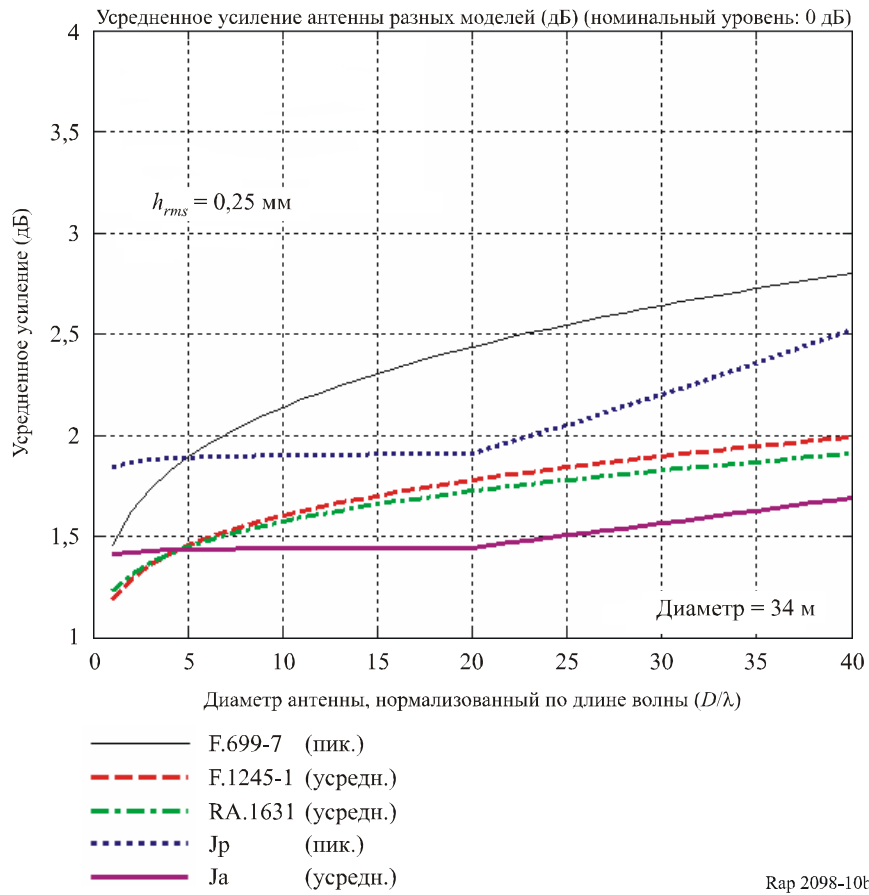
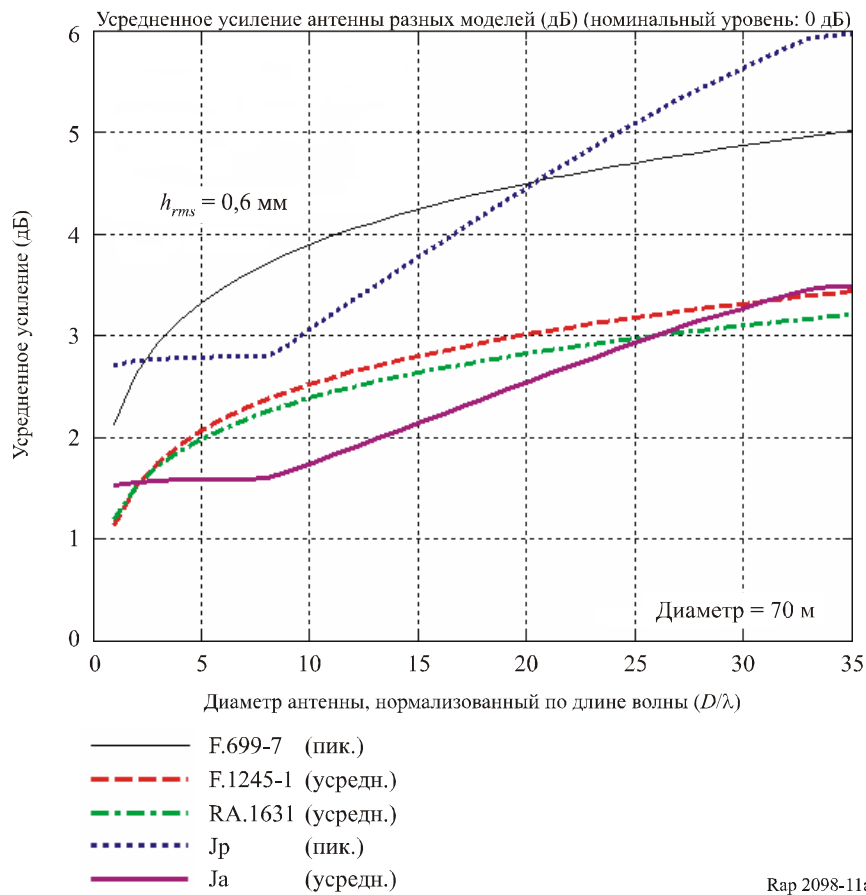


РИСУНОК 11а

Сравнение усредненного усиления разных моделей, модели Jr и Ja используются для антенны диаметром 70 м с погрешностью поверхности $h_{rms} = 0,60$ мм (Усредненное усиление (дБ))



Rap 2098-11a

РИСУНОК 11б

Сравнение усредненного усиления разных моделей, модели Jr и Ja используются для антенны диаметром 70 м с погрешностью поверхности $h_{rms} = 0,60$ мм (Линейное усредненное усиление)

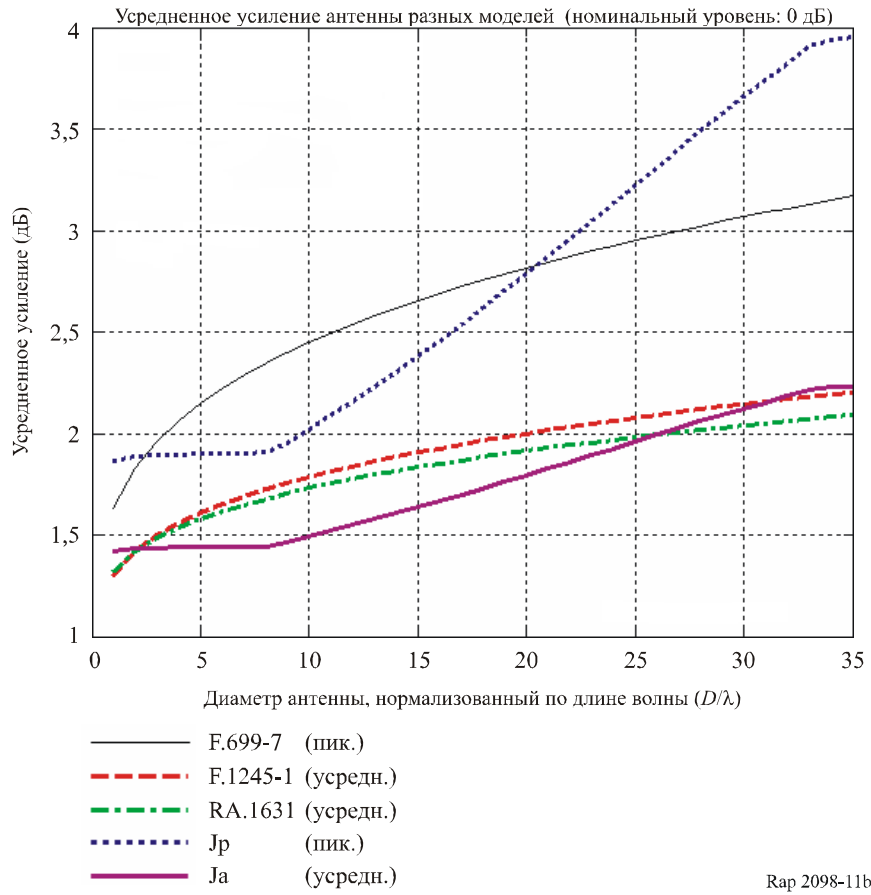


РИСУНОК 12а

Сравнение усредненного усиления разных моделей, модели Jr и Ja используются для антенны "плохого" качества с погрешностью поверхности $h_{rms} = 1/15 \lambda$. Включена расчетная теоретическая диаграмма направленности антенны с несколькими разными значениями длины корреляции ($c/\lambda = 2,5, 5, 10, 20, 40, 80, 160$)

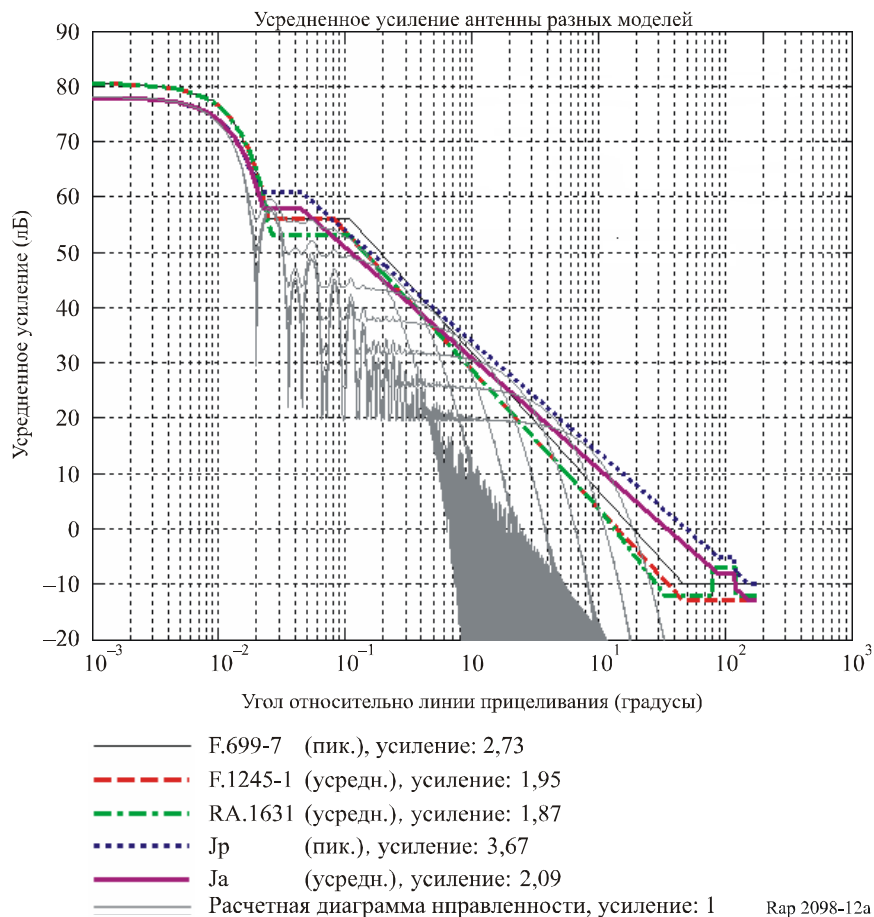


РИСУНОК 12b

Сравнение усредненного усиления разных моделей, модели Jp и Ja используются для антенны "среднего" качества с погрешностью поверхности $h_{rms} = 1/30 \lambda$. Включена расчетная теоретическая диаграмма направленности антенны с несколькими разными значениями длины корреляции ($c/\lambda = 2,5, 5, 10, 20, 40, 80, 160$)

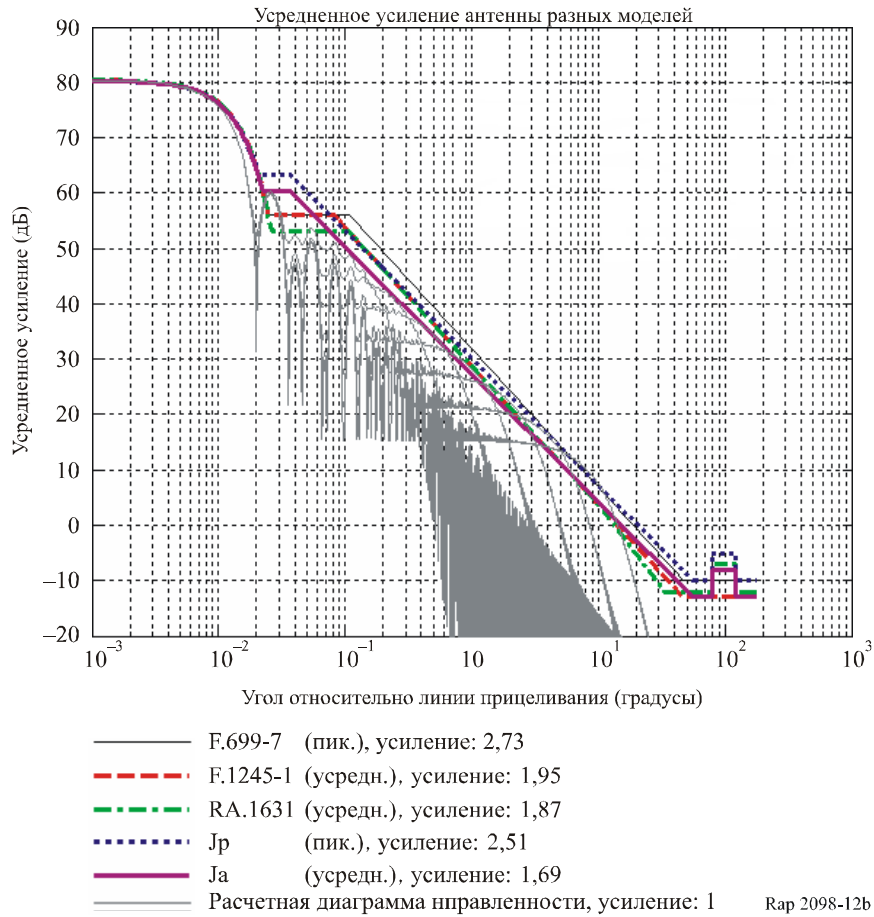


РИСУНОК 12с

Сравнение усредненного усиления разных моделей, модели Jp и Ja используются для антенны "хорошего" качества с погрешностью поверхности $h_{rms} = 1/60 \lambda$. Включена расчетная теоретическая диаграмма направленности антенны с несколькими разными значениями длины корреляции ($c/\lambda = 2,5, 5, 10, 20, 40, 80, 160$)

