



2.3. Характеристики антенн, влияющие на ЭМС, и их нормирование

Антенны РЭС имеют значительное разнообразие как по типам, так и по характеристикам [9, 10]. Вместе с тем все антенны можно подразделить на две группы: антенны осевого излучения и апертурные антенны. К антеннам осевого излучения относятся директорные («волновой канал»), лучевые, спиральные антенны. К апертурным антеннам относятся рупорные антенны (на основе конического или пирамидального рупора), одно- и двухзеркальные антенны с параболическим рефлектором или параболические антенны (ПА), а также комбинированные: рупорно-параболические (РПА), рупорно-линзовые (РЛА) и перископические антенны (ПРА).

Характеристики излучаемого антенной поля зависят от расстояния между антенной и точкой наблюдения. Результирующая напряженность поля, создаваемого антенной в свободном пространстве, зависит от разности хода волн Δr , образованных отдельными излучающими элементами антенны, являющихся элементарными излучателями. Когда выполняется условие $\Delta r \ll \lambda$ (λ — длина волны), антенна может рассматриваться как точечная. Расстояние от антенны, где это условие выполняется, называется дальней зоной, или зоной Фраунгофера. Здесь напряженность поля изменяется обратно пропорционально расстоянию. Характер изменения напряженности поля существенно зависит от расстояния R до передатчика. Различают ближнюю и дальнюю зону приема сигналов.

На практике граница дальней зоны $R_{дз}$ принимается равной [11, 12]

$$R_{дз} \approx 2L/\lambda, \quad (2.44)$$

где L — максимальный размер апертуры антенны. Граница ближней зоны, или зоны Релея, определяется соотношением [24]

$$R_{бз} \leq L/(2\lambda). \quad (2.45)$$

При $R \leq R_{бз}$ напряженность поля слабо зависит от расстояния. При расстояниях от антенны R , соответствующих условию

$$R_{бз} \leq R \leq R_{дз}, \quad (2.46)$$

напряженность поля быстро уменьшается с увеличением расстояния. Эта зона называется зоной Френеля [12].

Обычно характеристики антенны указывают для дальней зоны, вместе с тем при решении ряда задач, например, расчета условий внутриобъектовой ЭМС или расчета биологической

зоны передающей радиостанции (в которой должны выполняться санитарные нормы на уровень напряженности поля), требуются соответствующие характеристики антенн и в ближней зоне. Однако этот вопрос в литературе мало освещен, хотя некоторые данные по нему имеются в [10, 11] и в гл. 7. Так, в [11] показано, что расстояние до дальней зоны ПА с круглым зеркалом диаметром d_a зависит от угла наблюдения φ относительно главного направления излучения и при $\varphi = 90^\circ$, например, составляет

$$R'_{дз} \approx 2d_a, \quad (2.47)$$

что дает существенно меньшее значение, чем по (2.44). В [11] также предлагается аналитическая аппроксимация огибающей усиления ПА в ближней зоне, которая может оказаться полезной при решении специфических задач ЭМС.

Важно также отметить, что характеристики электромагнитного поля в дальней зоне антенны, где оно имеет сформировавшийся характер, не зависит от конструкции и типа антенны, а определяется только ее диаграммой направленности. Ниже рассмотрены характеристики антенны, влияющие на условия ЭМС.

2.3.1. Основные параметры антенн

Коэффициент усиления (КУ) антенны — отношение мощности, подводимой к ненаправленной (изотропной) антенне с коэффициентом усиления 1, к мощности, подводимой к данной антенне, при условии одинаковой напряженности поля в месте приема.

В общем случае КУ в децибелах (в дальней зоне) в главном направлении излучения или приема определяется (при нулевых омических потерях в элементах антенны) соотношением

$$g_{a\max} = 10\lg(4\pi S_a/\lambda^2), \quad (2.48)$$

где S_a — эффективная площадь антенны, которая зависит от типа и конструкции антенны [10].

Для антенн осевого излучения (директорные, спиральные) S_a имеет довольно сложную зависимость от относительной длины антенны [10]. В свою очередь относительная длина определяется числом директоров (в директорных антеннах) или числом витков (в спиральных антеннах), между которыми устанавливается расстояние порядка $(0,1 \dots 0,3)\lambda$. При этом число вибраторов или витков спирали в реальных антеннах может составлять 3–30.

Для ПА S_a зависит от формы и размеров зеркала, а также типа антенны (однозеркальная, двухзеркальная, неосесимметричная и др.) и определяется соотношением

$$S_a = S_z k_{\text{ин}}, \quad (2.49)$$

где S_z — площадь раскрытия основного зеркала; $k_{\text{ин}}$ — коэффициент использования поверхности апертуры (КИП); для типовых ПА в зависимости от ее типа $k_{\text{ин}}$ составляет $0,5 \dots 0,7$ [9].

При известных угловых размерах основного луча антенны КУ ориентировочно может быть рассчитан по формуле

$$g_{a\max} \approx 10\lg[44300/(\varphi_{0,5x}\varphi_{0,5y})], \quad (2.50)$$

где $\varphi_{0,5x}$ и $\varphi_{0,5y}$ — ширина основного луча антенны в градусах по половинной мощности во взаимно ортогональных плоскостях [10].

Для ближней зоны КУ можно оценить по формуле [10]

$$g_{a\max} \approx 10\lg(4\pi R^2/S_a), \quad (2.51)$$

которая для ПА с круглой формой зеркала имеет вид

$$g_{a\max} \approx 10\lg(16R^2/d_a). \quad (2.52)$$

Как видно из (2.51), (2.52), в ближней зоне КУ зависит от расстояния до точки наблюдения (чего нет в дальней зоне), а само значение КУ существенно меньше, чем в дальней зоне, рассчитанное в соответствии с (2.48) или (2.50).

Диаграмма направленности антенны (ДНА) определяет угловое распределение амплитуд напряженности электрического поля антенны $E(\varphi)$ в дальней зоне в двух ортогональных плоскостях при фиксированном удалении [9]. Обычно эти плоскости выбирают так, чтобы в одной из них был расположен вектор электрического поля E , а в другой — магнитного поля H . ДНА нормируется к максимальной интенсивности излучения, которое имеет место в главном направлении, т.е. при $\varphi = 0$, и представляется зависимостью

$$F^2(\varphi) = g_a(\varphi) - g_{a\max}, \quad (2.53)$$

где φ — угол наблюдения, образуемый направлением от точки расположения антенны до точки наблюдения и главным направлением излучения (приема) данной антенны; $F^2(\varphi)$ — значение ДНА, дБ, под углом φ ; $g_a(\varphi)$ — КУ антенны, дБ, под углом φ .

Иногда в качестве ДНА указывают зависимости $g_a(\varphi)$ [14–16]. Следует иметь в виду, что любая антенна излучает (принимает) электромагнитное поле не только на основной поляризации, но и на ортогональной (кроссполяризации). Причем ДНА на основной и кроссполяризации существенно отличаются. Вид типовых идеализированных ДНА в прямоугольных координатах в двух плоскостях показан на рис. 2.13. Здесь сплошная кривая соответствует ДНА в плоскости основной поляризации, а пунктирная кривая — ДНА в плоскости кроссполяризации. На рис. 2.13 показаны основные параметры ДНА: главный лепесток — часть ДНА, заключенная в секторе углов $\varphi_{01}'' < \varphi < \varphi_{01}'$, где φ_{01}'' и φ_{01}' — углы, соответствующие первому нулю ДНА в разные стороны от оси; $\varphi_{0,5}$ — ширина ДНА по половинной мощности, т.е. при $F^2(\varphi) = -3$ дБ; боковые лепестки (БЛ) и углы $\varphi_{1БЛ}$, $\varphi_{2БЛ}$, ..., соответствующие максимумам соответствующих БЛ; задний лепесток (ЗЛ); углы φ_{01} , φ_{02} , φ_{03} , соответствующие нулям ДНА. ДНА реальных антенн имеют значительно более сложный вид, чем на рис. 2.13 [9, 11]. В частности, реальные ДНА имеют асимметрию и изрезанность огибающей (рис. 2.14). Кроме того, на форму ДНА влияют неточности и особенности конструкции антенны, а также окружающие предметы, и в том числе поверхность земли [3, 10, 15].

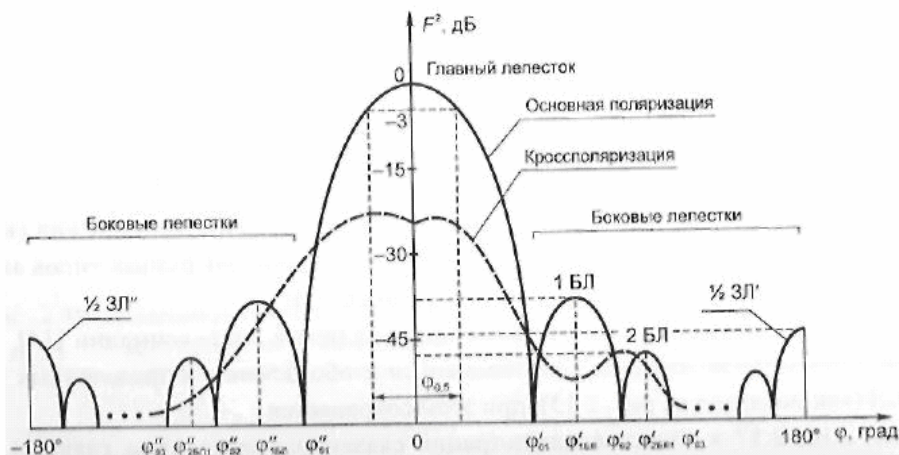


Рис. 2.13. Общий вид идеализированных ДНА на основной поляризации и кроссполяризации в прямоугольных координатах

Для расчета условий ЭМС, особенно сетевых структур радиосвязи, необходимо располагать полными зависимостями ДНА как на основной поляризации сигнала, так и на кросс-поляризации. Однако указанное влияние на параметры реальных антенн элементов их конструкции и окружающих предметов приводит к необходимости при проведении расчетов ЭМС прибегать к усредненным математическим описаниям характеристик антенн РЭС, в частности их ДНА. С этой целью на практике широко используются так называемые гарантированные огибающие ДНА в графической или аналитической форме, являющиеся результатом аппроксимации экспериментальных ДНА реальных антенн. На рис. 2.15 в качестве иллюстрации показана аппроксимация реальной экспериментальной ДНА с помощью трех простых аналитических функций: $F_1^2(\varphi) = 29 - 25 \lg(\varphi)$ в секторе углов $0 < |\varphi| \leq 20^\circ$; $F_2^2(\varphi) = 32 - 25 \lg(\varphi)$ в секторе углов $20 < |\varphi| \leq 48^\circ$ и $F_3^2(\varphi) = -10$ дБ в секторе углов $48 < |\varphi| \leq 180^\circ$.

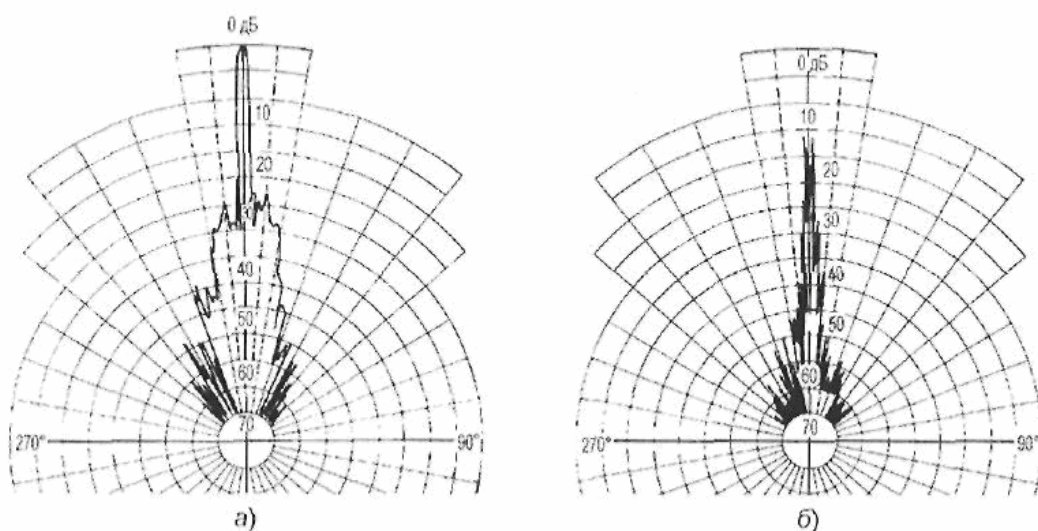


Рис. 2.14. Вид реальных ДНА на основной поляризации (а) и на кроссполяризации (б) в полярных координатах

Достоинством гарантированных ДНА является их достаточно простой вид (как графический, так и аналитический) и то, что их можно использовать для разных типов антенн, что способствует надежности результатов расчета условий ЭМС.

В настоящее время используются также более сложные аппроксимации [14], но важно то, что принцип аппроксимации, заключающийся в обеспечении определенных запасов в области БЛ (как показано на рис. 2.15), при этом сохраняется.

На рис. 2.16, 2.17 в качестве иллюстрации сказанного приведены главные лепестки усредненных ДНА антенны типа РПА-2П-2 на основной и кроссполяризации для частот 4 и 6 ГГц [11].

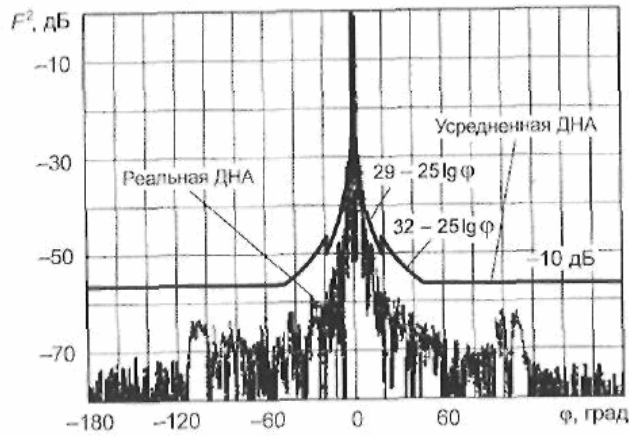


Рис. 2.15. Соотношение реальной ДНА и усредненной ДНА

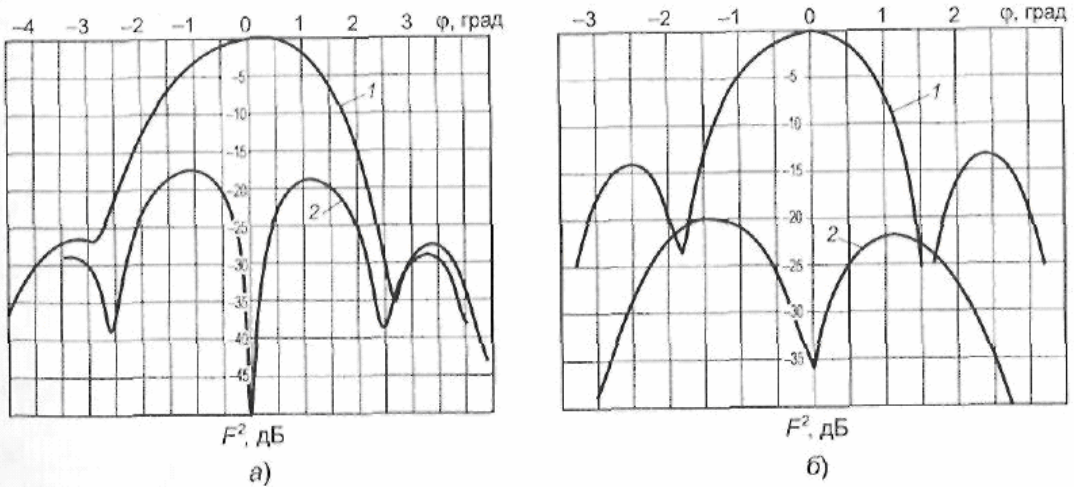


Рис. 2.16. Главные лепестки ДНА антенны РПА-2П-2 в диапазоне частот 4 ГГц для основной поляризации (1) и кроссполяризации (2) при вертикальной (а) и горизонтальной (б) поляризации сигнала

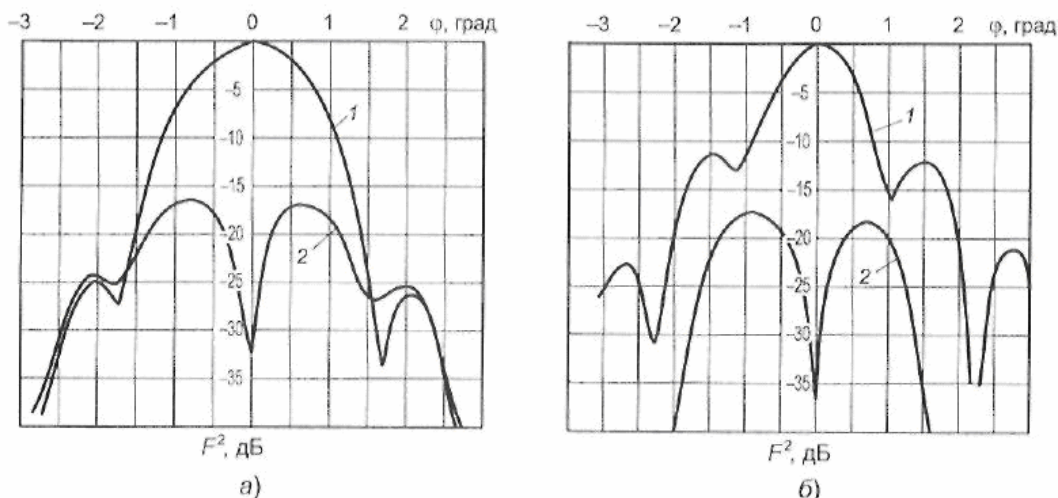


Рис. 2.17. Главные лепестки ДНА антенны РПА-2П-2 в диапазоне частот 6 ГГц на основной поляризации (1) и кроссполяризации (2) при вертикальной (а) и горизонтальной (б) поляризации сигнала

На рис. 2.18, 2.19 приведены гарантированные огибающие ДНА типа РПА-2П-2, применяемых в магистральных РРС [17], учитывающие влияние на параметры ДНА рабочей частоты сигнала и его поляризации. Здесь обозначено: ГП — горизонтальная поляризация; ВП — вертикальная поляризация.

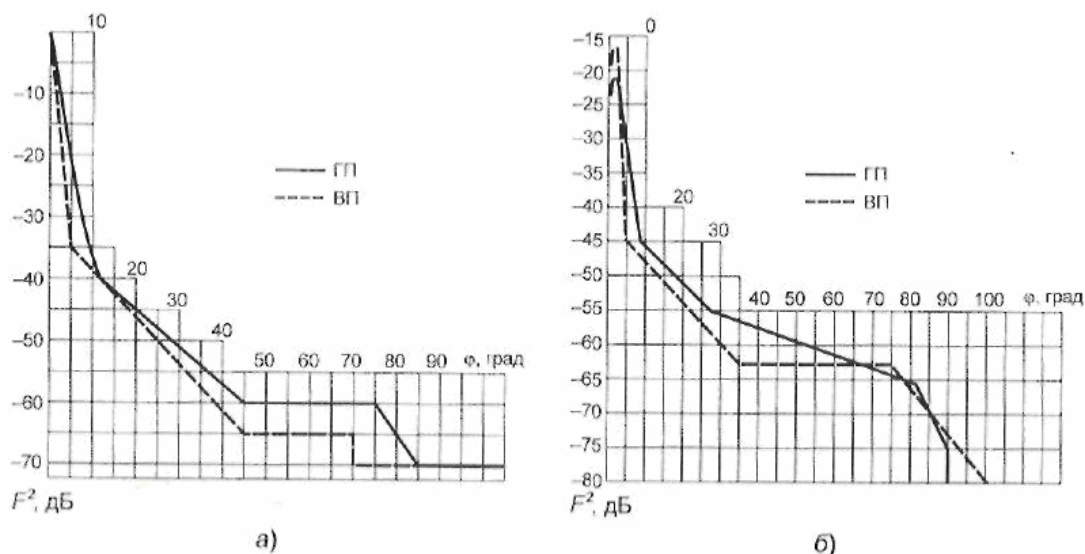


Рис. 2.18. Гарантированные огибающие ДНА антенны РПА-2П-2 в горизонтальной плоскости в диапазоне частот 4 ГГц на основной поляризации (а) и кроссполяризации (б)

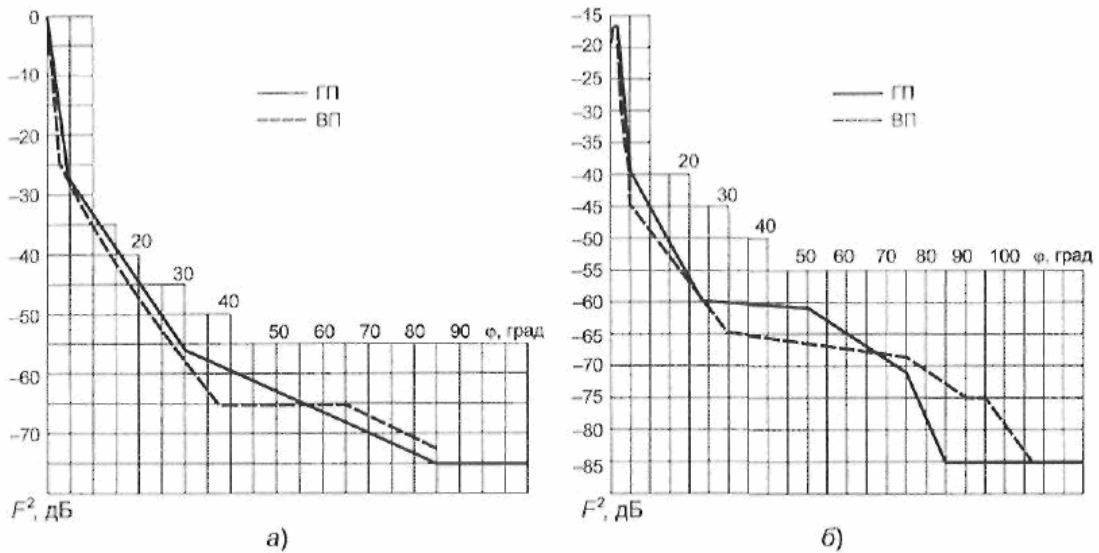


Рис. 2.19. Гарантированные огибающие ДНА антенны РПА-2П-2 в горизонтальной плоскости в диапазоне частот 6 ГГц на основной поляризации (а) и кроссполяризации (б)

На рис. 2.20 приведены гарантированные огибающие ДНА типа АНК [17]. Здесь: ВП — вертикальная поляризация; ГП — горизонтальная поляризация; КП — кроссполяризация. Антенна АНК является неосесимметричной однозеркальной ПА с вынесенным облучателем и имеет довольно высокую кроссполяризационную защиту (40 дБ) по сравнению с обычными ПА, у которых этот показатель составляет 25...30 дБ. Вместе с тем из рис. 2.20 видно, что параметры ДНА (особенно в заднем полупространстве) существенно зависят от поляризации сигнала. Этот факт, очевидно, обусловлен так же, как и у антенн типа РПА, асимметрией конструкции данной антенны.

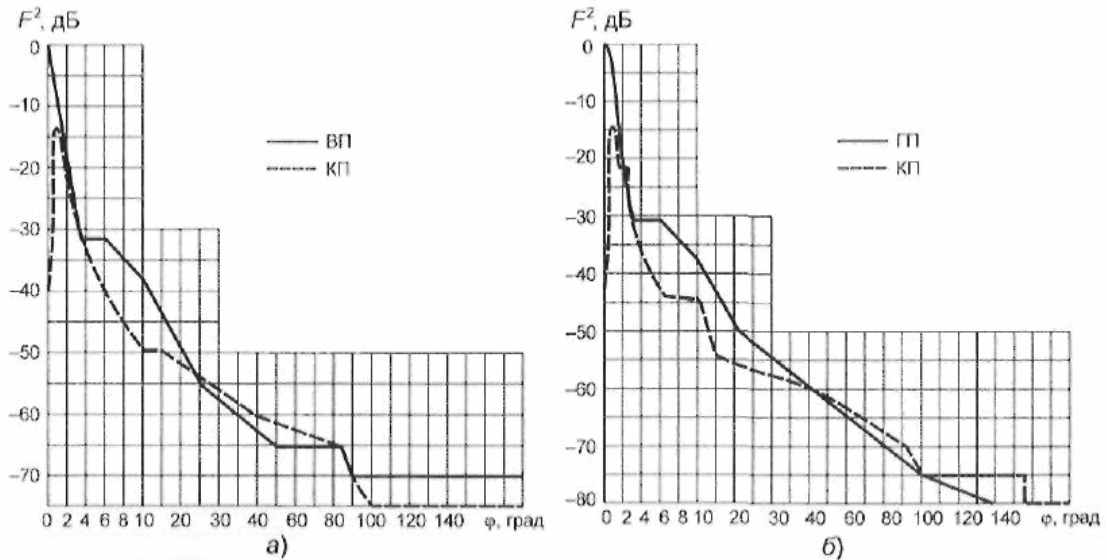


Рис. 2.20. Гарантированные диаграммы направленности антенны АНК-1,5 в горизонтальной плоскости в диапазоне частот 11 ГГц на основной вертикальной поляризации и кроссполяризации (а) и на основной горизонтальной поляризации и кроссполяризации (б)

В качестве примера можно привести математическое описание (в аналитической и графической форме) гарантированных огибающих БЛ двухзеркальных осесимметричных ПА типа АДЭ всех размеров, которые могут быть рассчитаны по соотношениям [9]:

$$F^2(\varphi) = \begin{cases} 40 - 10 \lg(d_a / \lambda) - 25 \lg(\varphi / 2) - g_{a \max} \geq -g_{a \max} & \text{при } 150(\lambda / d_a) \leq \varphi \leq 75^\circ; \\ -20 \lg([\varphi - 72] / 3) - g_{a \max} \geq -(g_{a \max} + 25) & \text{при } 75^\circ \leq \varphi \leq 170^\circ; \\ -20 - g_{a \max} & \text{при } 170^\circ \leq \varphi \leq 180^\circ. \end{cases} \quad (2.54)$$

На рис. 2.21 в качестве иллюстрации приведены гарантированные огибающие БЛ параболической антенны типа АДЭ-5 (диаметр 5 м) на частотах 2 и 4 ГГц, соответствующие (2.54). Можно отметить несколько отличный характер этих ДНА по сравнению с ДНА, представленными выше для других типов антенн. В частности, одной из особенностей этих ДНА является наличие явно выраженного заднего лепестка, который примерно на 5 дБ превышает уровень БЛ в секторе углов $125 \dots 170^\circ$. Следует отметить, что для этого типа антенн имеются данные по гарантированным ДНА, в которых задний лепесток не выражен [17] за счет того, что уровень ДНА в секторе углов $100 \dots 170^\circ$ указывается примерно на 5 дБ больше (штриховые линии на рис. 2.21).

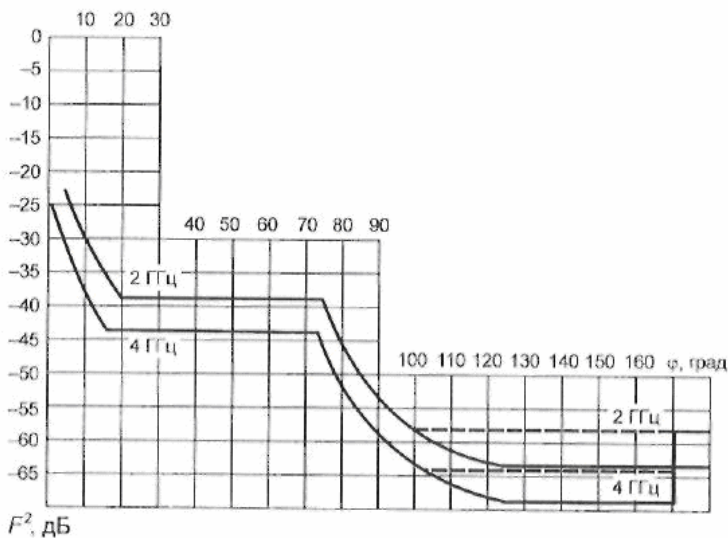


Рис. 2.21. Гарантированные огибающие диаграмм направленности антенны типа АДЭ-5 на частотах 2 и 4 ГГц

Кроссполяризационная защита антенны — ослабление поля перекрестной поляризации (кроссполяризованной волны). Кроссполяризационная защита антенны количественно определяется коэффициентом поляризационной защиты

$$XPD_a(\varphi) = g_{aоп}(\varphi) - g_{aкп}(\varphi), \quad (2.55)$$

где $g_{aоп}(\varphi)$ — КУ антенны на основной поляризации; $g_{aкп}(\varphi)$ — КУ антенны на кроссполяризации.

Зависимость $XPD_a(\varphi)$ имеет сложный характер, связанный с конструктивными особенностями антенн, а также параметрами сигнала. При этом для всех типов антенн максимум зависимости $XPD_{a \max}$ наблюдается при $\varphi = 0$, т.е. на главном направлении приема или вблизи

оси ДНА. Для типовых директорных и параболических антенн $25 \text{ дБ} \leq \text{XPD}_{\text{а max}} \leq 30 \text{ дБ}$, а для некоторого типа антенн, таких как РПА, может быть 40 дБ и более [17–20].

Как видно из представленных выше ДНА различных антенн, в области боковых и заднего лепестков ДНА, как правило, $\text{XPD}_{\text{а}}(\varphi) < 0$, что указывает на наличие дополнительных энергетических потерь (или отсутствие энергетического выигрыша) при приеме мешающих сигналов не на основной поляризации за пределами основного лепестка антенны.

Коэффициент защитного действия $K_{\text{зд}}$, характеризующий разность КУ антенны в главном направлении и КУ с обратного направления, имеет вид

$$K_{\text{зд}} = g_{\text{а}}(\varphi) - g_{\text{а}}(\varphi = 180^\circ). \quad (2.56)$$

Значения $K_{\text{зд}}$ современных антенн РЭС составляют 20...70 дБ [19–22].

В табл. 2.6 приведены основные параметры ПА для рабочей частоты 7 ГГц, полученные по материалам [20–23]. Из представленных данных видно, что при обеспечении более высокого значения $K_{\text{зд}}$ значение XPD существенно увеличивается (с 25 до 40 дБ).

Таблица 2.6. Основные параметры параболических антенн

Тип характеристик антенн	Диаметр, м	КУ, дБ	Ширина ДНА, град.	$K_{\text{зд}}$, дБ	XPD, дБ
Стандартные	0,6	30,7	5	40	25...27
	1,2	36,9	2,3	50	25...27
	2,4	42,9	1,3	60	25...27
Улучшенные	0,6	30,7	5	43	27...30
	1,2	36,9	2,3	53	27...30
	2,4	42,9	1,3	64	27...30
Высокие	0,6	30,7	5	60	30...32
	1,2	36,9	2,3	65	30...32
	2,4	42,9	1,3	72	30...32
Очень высокие	0,6	30,7	5	62	40
	1,2	36,9	2,3	68	40
	2,4	42,9	1,3	74	40

2.3.2. Нормирование характеристик антенн

При расчетах ЭМС РЭС наиболее важными характеристиками антенн, требующими нормирования, являются ДНА на основной поляризации и кроссполяризации. Нормирование ДНА осуществляется для всех видов РЭС общего назначения, конкретные данные о нормировании можно найти, например, в [9, 11, 13, 16–18]. Причем нормирование осуществляется как на международном, так и национальном или корпоративном уровне. В последних случаях нормирование характеристик антенн имеет уточняющий характер [9, 16–18]. При этом соответствующие национальные и корпоративные нормативы должны согласовываться с международными нормативами, поскольку последние в соответствии с Регламентом радиосвязи имеют приоритет.

Особо актуально нормирование ДНА для многоканальных широкополосных средств радиосвязи (СРС), таких, как спутниковые (ССС) и радиорелейные системы связи (РСС),

которые используют общие полосы рабочих частот в УКВ диапазоне (главным образом в диапазоне частот 1...40 ГГц). Ниже приводятся сведения о действующем на данный момент нормировании ДНА ССС и РСС. Следует отметить, что к РСС относят радиорелейные линии прямой видимости (РРЛ) и радиорелейные системы типа «точка–многоточка» (ТМТ).

Для практических расчетов помех и решения вопросов координации указанных видов СРС в диапазоне частот 1...40 ГГц рекомендуется использовать так называемые эталонные (справочные) ДНА, устанавливающие допустимые значения огибающей ДНА, т.е. такие, которые не должны превышаться при использовании реальных антенн [14, 15, 18].

Эталонные ДНА для РРЛ прямой видимости в диапазоне 1...40 ГГц (параболические антенны) определяются соотношениями, приведенными ниже, которые получены на основании соотношений, содержащихся в [13] в виде аналитических зависимостей $g_a(\varphi)$.

При отношении диаметра антенны d_a к рабочей длине волны λ больше 100 должны применяться следующие уравнения:

$$F^2(\varphi) = \begin{cases} -2,5 \cdot 10^{-3} (d_a \varphi / \lambda)^2 & \text{при } 0 \leq \varphi \leq \varphi_m; \\ g_{a1} - g_{a \max} & \text{при } \varphi_m \leq \varphi \leq \varphi_r; \\ 32 - 25 \lg \varphi - g_{a \max} & \text{при } \varphi_r \leq \varphi \leq 48^\circ; \\ -10 - g_{a \max} & \text{при } 48^\circ \leq \varphi \leq 180^\circ, \end{cases} \quad (2.57)$$

где d_a и λ в одинаковых единицах; $g_{a \max} = 7,7 + 20 \lg(d_a / \lambda)$ — КУ антенны; $g_{a1} = 2 + 15 \lg(d_a / \lambda)$ — КУ первого БЛ; $\varphi_m = 20 \lambda \sqrt{g_{a \max} - g_{a1}} / d_a$, град.; $\varphi_r = 15,85 (d_a / \lambda)^{-0,6}$, град.

При отношении $d_a / \lambda \leq 100$ следует использовать следующие уравнения:

$$F^2(\varphi) = \begin{cases} -2,5 \cdot 10^{-3} (d_a \varphi / \lambda)^2 & \text{при } 0 \leq \varphi \leq \varphi_m; \\ g_{a1} - g_{a \max} & \text{при } \varphi_m \leq \varphi < 100(\lambda / d_a); \\ 52 - 10 \lg(d_a / \lambda) - 25 \lg \varphi - g_{a \max} & \text{при } 100(\lambda / d_a) \leq \varphi < 48^\circ; \\ 10 - 10 \lg(d_a / \lambda) - g_{a \max} & \text{при } 48^\circ \leq \varphi \leq 180^\circ. \end{cases} \quad (2.58)$$

На рис. 2.22 представлены огибающие эталонных ДНА в графической форме, построенные по (2.57) и (2.58).

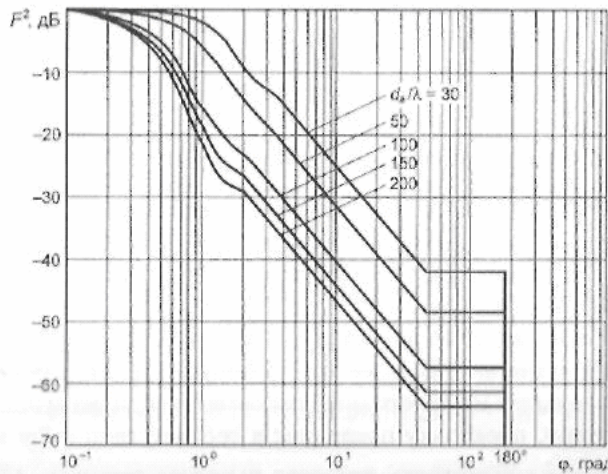


Рис. 2.22. Огибающие ДНА РРЛ в диапазоне частот 1...40 ГГц при разных значениях отношения диаметра антенны d_a и длины волны λ .

При изучении вопросов координации и оценке взаимных помех между радиорелейными системами ТМТ и между станциями таких систем и другими службами, работающими в той же полосе частот в диапазоне 1...3 ГГц, рекомендованы эталонные ДНА, приведенные ниже.

В случаях, когда на станции ТМТ применяется антенна с всенаправленной ДНА в горизонтальной плоскости или около нее, используют следующее уравнение для оценки ДНА в вертикальной плоскости:

$$F^2(\varphi) = \max\{g_{a1}(\varphi), g_{a2}(\varphi)\} - g_{a \max} \quad (2.59)$$

где $g_{a1}(\varphi) = -12(\varphi/\varphi_{0,5})^2$; $g_{a2}(\varphi) = -12 + 10 \lg[\max\{\varphi/\varphi_{0,5}, 1\}]^{-1,5} + k$; φ — угол в вертикальной плоскости относительно направления максимального усиления антенны, град.; $g_{a \max}$ — максимальный коэффициент усиления антенны, дБ, в горизонтальной плоскости или около нее; $\varphi_{0,5} = 1/\{[(10^{0,1g_{a \max}} + 172,4)/191]^2 - 0,818\}$ — ширина ДНА в вертикальной плоскости; k —

параметр, учитывающий повышенные уровни БЛ по сравнению с уровнем БЛ идеальной антенны; в случае типовых антенн $k = 1,5$, а для антенн с уменьшенными уровнями БЛ $k = 0$.

На рис. 2.23 в качестве иллюстрации представлены ДНА всенаправленных антенн систем ТМТ для двух значений коэффициента усиления антенны и различных значениях коэффициента k , описываемых уравнениями, входящими в (2.59).

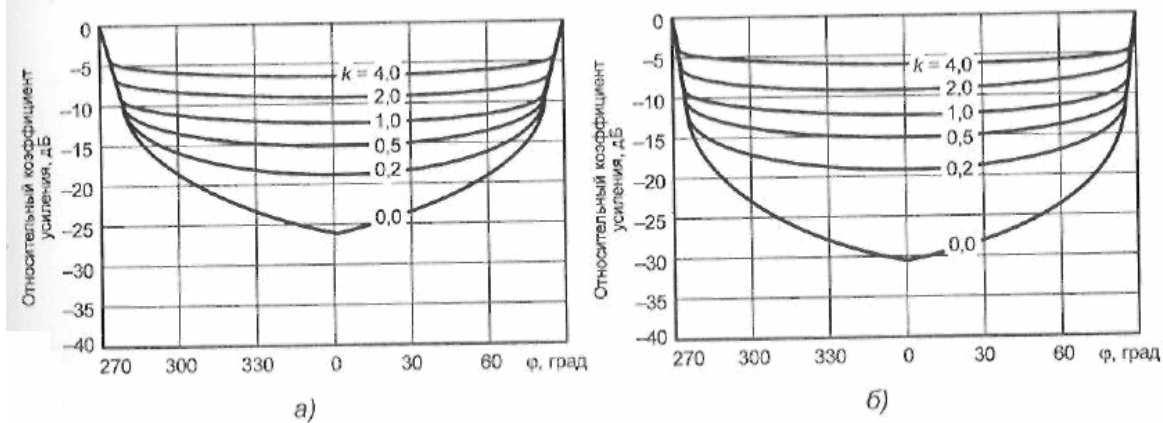


Рис. 2.23. Эталонные диаграммы направленности всенаправленных антенн радиорелейных систем «точка-многоточка»:
а — $g_{a \max} = 10$ дБ; б — $g_{a \max} = 13$ дБ

В случае использования на абонентских станциях (АС) систем ТМТ антенн с $g_{a \max} < 20$ дБ должны использоваться следующие уравнения:

$$F^2(\varphi) = \begin{cases} -12(\varphi/\theta_{0,5})^2 & \text{при } 0 \leq \varphi \leq \varphi_1; \\ -14 & \text{при } \varphi_1 \leq \varphi < \varphi_2; \\ -14 - 32 \lg(\varphi/\varphi_1) & \text{при } \varphi_2 \leq \varphi < \varphi_3; \\ -8 - g_{a \max} & \text{при } \varphi_3 \leq \varphi \leq 180^\circ, \end{cases} \quad (2.60)$$

где $\varphi_1 = 1,078\theta_{0,5}$; $\theta_{0,5} = \sqrt{2,7 \cdot 10^{(4-0,1g_{a \max})}}$; $\varphi_2 = 1,9\theta_{0,5}$; $\varphi_3 = \varphi_2 \cdot 10^{(g_{a \max} - 6)/32}$.

Эталонные ДНА спутниковых систем фиксированных служб (ФССС) на международном уровне определяются Рекомендациями 580 и 465 МСЭ-Р, согласно которым 90% пиков уровней БЛ не должны превышать значений, определяемых соотношениями [11]:

$$F^2(\varphi) = \begin{cases} 29 - 25 \lg \varphi - g_{a, \max} & \text{при } \varphi_{\min} \leq \varphi < 20^\circ; \\ -3,5 - g_{a, \max} & \text{при } 20^\circ \leq \varphi < 26,3^\circ; \\ 32 - 25 \lg \varphi - g_{a, \max} & \text{при } 26,3^\circ \leq \varphi < 48^\circ; \\ -10 - g_{a, \max} & \text{при } 48^\circ \leq \varphi \leq 180^\circ. \end{cases} \quad (2.61)$$

В (2.61) параметр φ_{\min} определяется по формуле

$$\varphi_{\min} = \begin{cases} 1 & \text{при } 100(\lambda/d_a) \leq 1; \\ 100(\lambda/d_a) & \text{при } 100(\lambda/d_a) > 1. \end{cases}$$

На рис. 2.24 соотношения (2.61) представлены в графической форме совместно с экспериментальной ДНА (нижний график) неосесимметричной двухзеркальной ПА фирмы Vertex диаметром 2,4 м, имеющей в диапазоне 6 ГГц коэффициент усиления порядка 42 дБ [11]. Из рисунка видно, что ДНА данной антенны соответствует нормам (Рекомендации МСЭ), причем с запасом. Отметим, что эталонные ДНА (как МСЭ-Р, так и национальные или корпоративные) предусматривают определенное превышение допустимых значений. Так, Рекомендациями МСЭ, определяемыми соотношениями (2.61), допускается превышение допустимых значений на 10%.

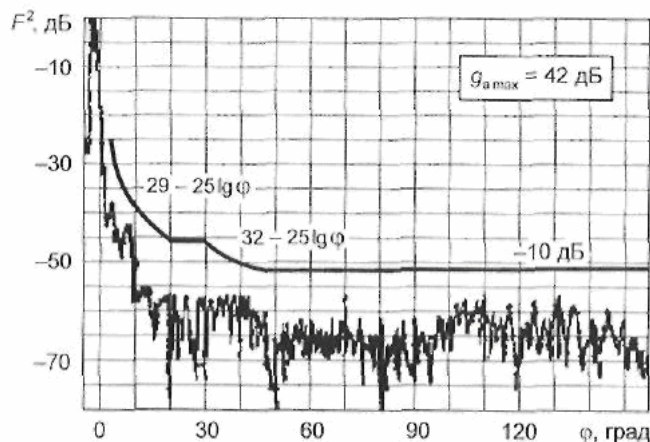


Рис. 2.24. Соответствие реальной огибающей ДНА ФССС эталонной ДНА, рекомендуемой МСЭ

Эталонные ДНА спутниковой вещательной службы, действующей в полосах частот 18/12 ГГц (СТВ-12), установлены Планом ВАКР (первоначально ВАКР-77 принят в 1977 г., а впоследствии уточнен). Следует отметить, что существенным достоинством Плана является комплексный характер проработки нормативных показателей СТВ, включая и эталонные ДНА [18]. При этом эталонные ДНА нормируют направленные свойства антенн как на основной поляризации, так и на кроссполяризации для всех типов станций СТВ. В Пlane предусмотрено применение передающих антенн ЗС диаметром 5 м с усилением 57,4 дБ на частоте 17,55 ГГц.

Эталонные ДНА передающих ЗС СТВ-12 определяются по соотношениям:
– для основной поляризации

$$F^2(\varphi) = \begin{cases} 36 - 20 \lg \varphi - g_{a, \max} & \text{при } 0,1^\circ \leq \varphi < 0,32^\circ; \\ 51,3 - 53,2\varphi - g_{a, \max} & \text{при } 0,32^\circ \leq \varphi < 0,54^\circ; \\ 29 - 25 \lg \varphi - g_{a, \max} & \text{при } 0,54^\circ \leq \varphi < 36^\circ; \\ -10 - g_{a, \max} & \text{при } \varphi \geq 36^\circ; \end{cases} \quad (2.62)$$

– для кроссполяризации

$$F^2(\varphi) = \begin{cases} -30 & \text{при } \varphi < 0,6/d_a; \\ 9 - 20 \lg \varphi - g_{a, \max} & \text{при } 0,6/d_a \leq \varphi < 8,7^\circ; \\ -10 - g_{a, \max} & \text{при } \varphi \geq 8,7^\circ. \end{cases} \quad (2.63)$$

На рис. 2.25 соотношения (2.62), (2.63) представлены в графической форме.

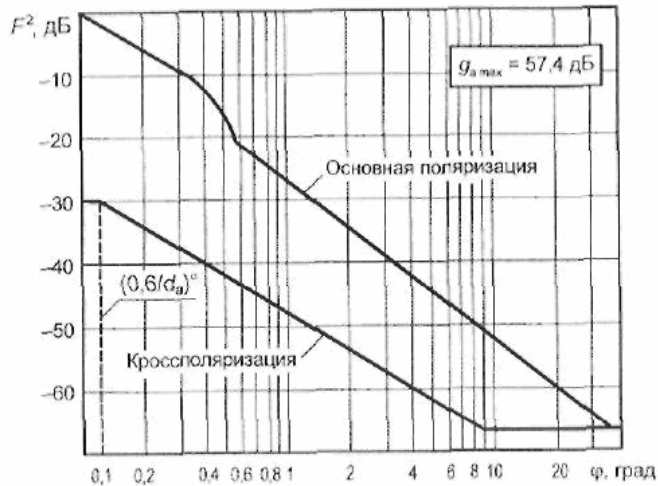


Рис. 2.25. Эталонные ДНА передающих ЗС СТВ-12

При использовании данных эталонных ДНА имеются следующие ограничения:

- в пределах углов $\varphi = 0,1 \dots 0,54^\circ$ уровни БЛ на основной поляризации не должны превышать значений эталонной ДНА;
- в пределах углов $\varphi = 0 \dots (0,6/d_a)$ уровни БЛ на кроссполяризации не должны превышать значений эталонной ДНА;
- в пределах углов $\varphi = 0,54 \dots 180^\circ$ на основной поляризации 90% пиков БЛ не должно превышать значений эталонной ДНА.

Огибающие типовых эталонных ДНА (передающих и приемных) космических станций (КС) СТВ-12 Районов 1 и 3:

– для основной поляризации

$$F^2(\varphi) = \begin{cases} -12(\varphi/\varphi_{0,5})^2 & \text{при } 0 \leq \varphi \leq 1,58\varphi_{0,5}; \\ -30 & \text{при } 1,58\varphi_{0,5} \leq \varphi \leq 3,16\varphi_{0,5}; \\ -17,5 - 25 \lg(\varphi/\varphi_{0,5}) & \text{при } \varphi > 3,16\varphi_{0,5}^*; \end{cases} \quad (2.64)$$

– для кроссполяризации

$$F^2(\varphi) = \begin{cases} -40 - 40 \lg[(\varphi / \varphi_{0,5}) - 1] & \text{при } 0 \leq \varphi \leq 0,33\varphi_{0,5}; \\ -33 & \text{при } 0,33\varphi_{0,5} \leq \varphi \leq 1,67\varphi_{0,5}; \\ 40 - 40 \lg[(\varphi / \varphi_{0,5}) - 1] & \text{при } \varphi > 1,67\varphi_{0,5}. \end{cases} \quad (2.65)$$

Примечание: * До уровня изотропного излучения $F^2(\varphi) = -g_{a \max}$.

В Планы предусмотрены также эталонные ДНА (передающих) КС СТВ-12 с повышенной избирательностью, определяемых выражениями:

$$F^2(\varphi) = \begin{cases} -12(\varphi / \varphi_{0,5})^2 & \text{при } 0 \leq \varphi \leq 0,5\varphi_{0,5}; \\ -18,75\varphi_{0,5}^2(\varphi / \varphi_{0,5} - x)^2 & \text{при } 0,5\varphi_{0,5} \leq \varphi \leq x\varphi_{0,5} + 1,16; \\ -25,23 & \text{при } x\varphi_{0,5} + 1,16 < \varphi \leq 1,45\varphi_{0,5}; \\ -22 - 20 \lg(\varphi / \varphi_{0,5}) & \text{при } \varphi > 1,45\varphi_{0,5}, \end{cases} \quad (2.66)$$

где $x = 0,5(1 - 0,8/\varphi_{0,5})$.

На рис. 2.26 и 2.27 соотношения (2.65)–(2.66) представлены в графической форме.

Можно отметить, что в этом случае эталонные ДНА зависят от параметра $\varphi_{0,5}$. Наименьшее значение этого параметра принято $\varphi_{0,5} = 0,8^\circ$, и при этом ДНА с повышенной избирательностью совпадает с типовой ДНА (верхняя кривая на рис. 2.26).

Эталонные ДНА приемных ЗС СТВ-12 в Районах 1 и 3:

– на основной поляризации для индивидуальных ЗС

$$F^2(\varphi) = \begin{cases} 0 & \text{при } 0 \leq \varphi \leq 0,25\varphi_{0,5}; \\ -12(\varphi / \varphi_{0,5})^2 & \text{при } 0,25\varphi_{0,5} < \varphi \leq 0,707\varphi_{0,5}; \\ -9 - 20 \lg(\varphi / \varphi_{0,5}) & \text{при } 0,707\varphi_{0,5} < \varphi \leq 1,26\varphi_{0,5}; \\ -8,5 - 25 \lg(\varphi / \varphi_{0,5}) & \text{при } 1,26\varphi_{0,5} < \varphi \leq 9,55\varphi_{0,5}; \\ -33 & \text{при } \varphi > 9,55\varphi_{0,5}, \end{cases} \quad (2.67)$$

где $\varphi_{0,5} = 2^\circ$;

– для коллективных ЗС (имеющих диаметр антенн $> 1,5$ м)

$$F^2(\varphi) = \begin{cases} 0 & \text{при } 0 \leq \varphi \leq 0,25\varphi_{0,5}; \\ -12(\varphi / \varphi_{0,5})^2 & \text{при } 0,25\varphi_{0,5} < \varphi \leq 0,86\varphi_{0,5}; \\ -10,5 - 25 \lg(\varphi / \varphi_{0,5}) & \text{при } \varphi > 0,86\varphi_{0,5}, \end{cases} \quad (2.68)$$

где $\varphi_{0,5} = 1^\circ$;

– на кроссполяризации:

$$F^2(\varphi) = \begin{cases} -25 & \text{при } 0 \leq \varphi \leq 0,25\varphi_{0,5}; \\ -30 - 10 \lg(\varphi / \varphi_{0,5} - 1) & \text{при } 0,25\varphi_{0,5} < \varphi \leq 0,44\varphi_{0,5}; \\ -20 & \text{при } 0,44\varphi_{0,5} < \varphi \leq 1,44\varphi_{0,5}; \\ -30 - 25 \lg(\varphi / \varphi_{0,5} - 1) & \text{при } 1,44\varphi_{0,5} < \varphi \leq 2\varphi_{0,5}. \end{cases} \quad (2.69)$$

Соотношения (2.67)–(2.69) представлены в графической форме на рис. 2.28.

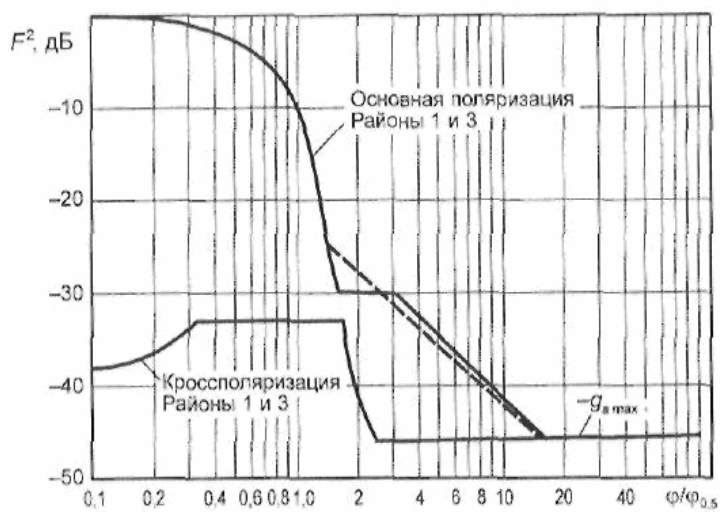


Рис. 2.26. Типовые эталонные ДНА (передающих и приемных) космических станций СТВ-12

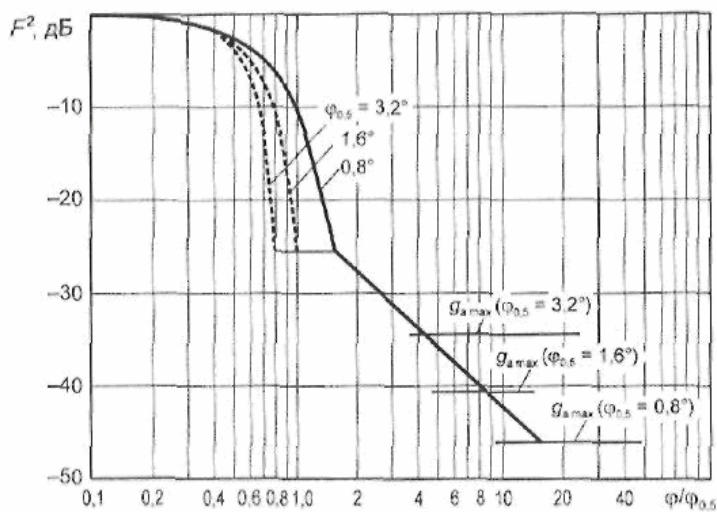


Рис. 2.27. Эталонные ДНА (передающих) космических станций СТВ-12 с повышенной избирательностью

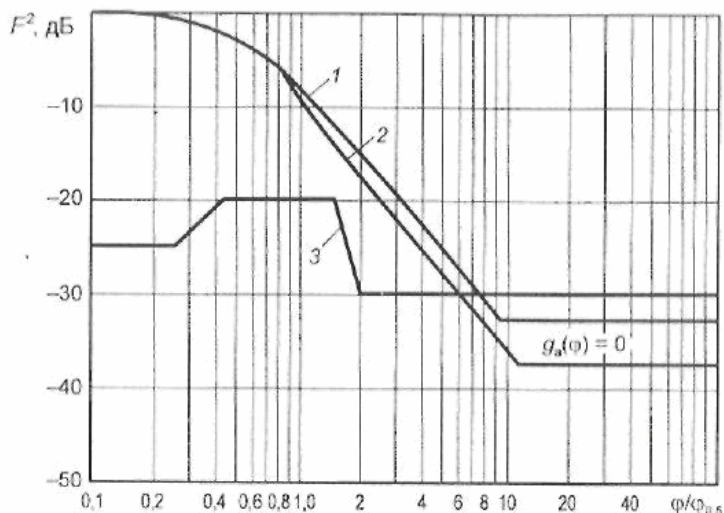


Рис. 2.28. Эталонные ДНА приемных ЗС СТВ-12:
 1 — индивидуальные ЗС в Районах 1 и 3 на основной поляризации;
 2 — коллективные ЗС в Районах 1 и 3 на основной поляризации;
 3 — индивидуальные и коллективные ЗС в Районах 1 и 3 на кроссполаризации

Огибающие ДНА базовых (БС) и абонентских (АС) станций систем беспроводного доступа (СБД) определены в стандарте ETSI [24]. Антенны БС могут быть ненаправленными и секторными. Ширина сектора, который обслуживается БС с секторной антенной, определяется углом 2θ ($15 \leq \theta \leq 180^\circ$; для ненаправленных антенн $\theta = 180^\circ$). На рис. 2.29 приведена зависимость коэффициента усиления антенн БС от угловой ширины сектора обслуживания θ .

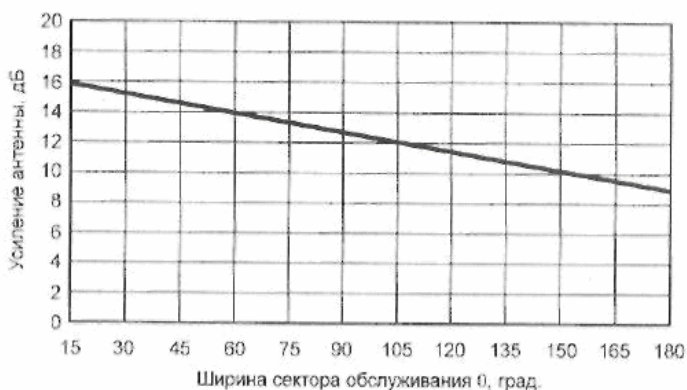


Рис. 2.29. Коэффициент усиления антенны базовой станции СБД в зависимости от ширины сектора

На рис. 2.30 показаны типовые ДН антенны БС на основной поляризации (сплошная линия) и на кроссполаризации (пунктирная линия). Отметим, что разность между кривыми на рис. 2.30 определяет коэффициент поляризационной развязки XPD_p . Положения точек P_i и Q_i на этом графике задаются значениями, приведенными в табл. 2.7.

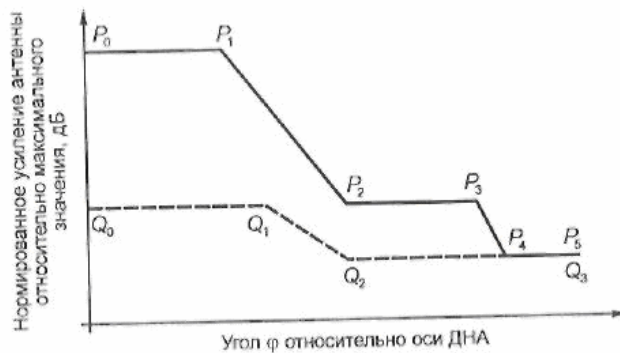


Рис. 2.30. Огибающая ДНА базовой станции СБД

Таблица 2.7. Значения величин на рис. 2.30

Точка	Угол φ , град.	Относительное усиление, дБ
<i>ДНА по основной поляризации</i>		
P_0	0	0
P_1	$\theta + 5$	0
P_2	$\theta + 63$	-20
P_3	153	-20
P_4	158	-25
P_5	180	-25
<i>ДНА по кросс-поляризации</i>		
Q_0	0	-20
Q_1	$\theta + 27,5$	-20
Q_2	$\theta + 57,5$	-25
Q_3	180	-25

Диаграммы направленности АС. Антенны АС являются направленными с коэффициентом усиления 10 дБ [24]. На рис. 2.31 показаны типовые ДНА абонентских станций СБД на основной поляризации (сплошная линия) и на кроссполяризации (пунктирная линия). На этом рисунке сплошными линиями показана ДНА на основной поляризации, а пунктирными — кроссполяризационная ДНА. Положения точек P_i и Q_i на этом графике задаются значениями, приведенными в табл. 2.8.

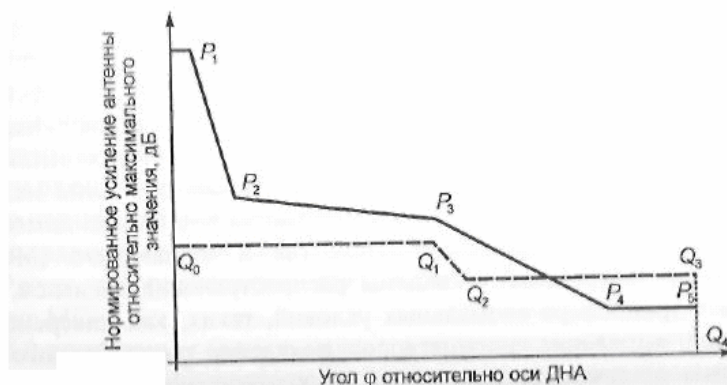


Рис. 2.31. Огибающая ДНА абонентской станции СБД

Таблица 2.8. Значения величин на рис. 2.31

Точка	Угол φ , град.	Относительное усиление, дБ
<i>ДНА по основной поляризации</i>		
P_0	0	0
P_1	8	0
P_2	20	-20
P_3	90	-22
P_4	150	-35
P_5	180	-35
<i>ДНА по кросс-поляризации</i>		
Q_0	0	-25
Q_1	90	-25
Q_2	150	-35
Q_3	180	-35