

О ПОНЯТИЯХ КОЭФФИЦИЕНТА УСИЛЕНИЯ И КПД АНТЕНН В ЗАДАЧАХ ЭМС

ПРО ПОНЯТТЯ КОЕФІЦІЄНТА ПІДСИЛЕННЯ Й ККД АНТЕН У ЗАДАЧАХ ЕМС

ABOUT CONCEPTS OF ANTENNAS GAIN AND AN EFFICIENCY IN EMS PROBLEMS

Аннотация. Обсуждаются некоторые особенности определений коэффициента усиления (КУ) и коэффициента полезного действия (КПД) антенны применительно к задачам электромагнитной совместимости. Предложено новое понятие коэффициента поляризационной эффективности излучения антенны. С учетом этого рассмотрены и обсуждены результаты вычислений КУ и КПД на примере антенны в виде плоской спирали Архимеда.

Анотація. Обговорюються деякі особливості визначень коефіцієнта підсилення (КП) і коефіцієнта корисної дії (ККД) антени стосовно до задач електромагнітної сумісності. Запропоноване нове поняття коефіцієнта поляризаційної ефективності випромінювання антени. З урахуванням цього розглянуті й обговорені результати обчислень КП й ККД на прикладі антени у вигляді плоскої спіралі Архімеда.

Summary. Some features of definitions of antenna gain and efficiency for problems of electromagnetic compatibility are discussed. The new concept of factor of polarizing efficiency of radiation of the aerial is offered. Examples of calculation gain and efficiency of the antenna as flat Archimedean spiral are considered and discussed.

Стремительное нарастание процессов глобализации экономики сопровождается высокими темпами развития коммуникационных технологий, что повышает роль и значение различных средств коммуникации и, в частности, радиоэлектронных средств (РЭС). Количественное и качественное развитие РЭС различного назначения приводит к необходимости решения задач рационального использования радиоспектра, требует более детального исследования характеристик антенн в процессе оценки и обеспечения электромагнитной совместимости (ЭМС).

При этом специфика функционирования различных радиослужб зачастую обуславливает необходимость внесения в общую методологию оценки ЭМС определенных изменений и дополнений. Это может касаться параметров антенно-фидерных устройств РЭС, в частности такого, как коэффициент усиления антенны – одной из основных количественных характеристик, используемых при анализе условий ЭМС, в том числе и вне рабочего диапазона частот РЭС.

В отечественной и зарубежной научной, учебной и технической литературе по антенной тематике [1–5] коэффициент усиления антенны обычно определяют в виде произведения коэффициента направленного действия (КНД) и коэффициента полезного действия антенны. При этом в большинстве случаев учитываются только тепловые потери в антенне, а КУ определяется как отношение полной мощности излучения к мощности, подводимой к антенне.

Это определение КУ в большей степени справедливо при идеальном согласовании фидера с антенной и для направления максимального излучения поля основной поляризации.

Такой подход может привести к неверным оценкам и выводам при анализе ЭМС РЭС, так как не учитываются в полной мере особенности поляризационной структуры поля излучения, в особенности вне направления максимального излучения и за пределами рабочего диапазона частот, а также наличие отражений от входа антенны.

Целью данной работы является новая смысловая интерпретация и уточнение формулировки понятий КУ и КПД антенно-фидерного устройства для более корректного учета его особенностей в задачах ЭМС.

1. Коэффициент направленного действия (КНД). Это понятие, введенное в 1929 г. А.А. Пистолькорсом [6], является количественной мерой, характеризующей способность антенны концентрировать энергию излучаемых электромагнитных волн в определенном направлении¹.

Коэффициент направленного действия D (если рассматривается антенна в режиме излучения, возбуждаемая источником монохроматических колебаний) есть отношение интенсивности излучения

¹ В англоязычной технической литературе аналогичное понятие – это «directivity», что означает «направленность» и применительно к антеннам на русский язык переводится, как «КНД в направлении максимума главного лепестка» [7], то есть его максимальное значение. Возможно, логичнее русскоязычный термин назвать «коэффициентом направленности» антенны – аналогично применяемому в отечественной антенной науке термину «коэффициент усиления» антенны.

в дальней зоне этой антенны в направлении, определяемом координатными углами θ, φ , к интенсивности излучения этой же антенны усредненной по всем направлениям:

Поскольку интенсивность излучения (с точностью до постоянного коэффициента) определяется амплитудной характеристикой направленности (АХН) антенны, то КНД (назовем его полным КНД), как функция угловых координат, вычисляется с использованием известного выражения [1]

$$D(\theta, \varphi) = \frac{4\pi |\dot{f}(\theta, \varphi)|^2}{\int_0^{2\pi} \int_0^\pi |\dot{f}(\theta', \varphi')|^2 \sin \theta' d\theta' d\varphi'} = D_0 |\dot{f}(\theta, \varphi)|^2, \quad (1)$$

где D_0 – это максимальное значение КНД.

Из формулы (1) видно, что для вычисления $D(\theta, \varphi)$ обязательно необходимо знать пространственную АХН антенны, т.е. функцию $|\dot{f}(\theta, \varphi)|$.

В большинстве практических приложений АХН антенны удобнее определять для каждой из ортогональных компонент в отдельности, поэтому вводят [1] понятие парциального КНД, вычисляемого по каждой компоненте

$$D_{[m]}(\theta, \varphi) = \frac{4\pi |\dot{f}_{[m]}(\theta, \varphi)|^2}{\int_0^{2\pi} \int_0^\pi |\dot{f}_{[m]}(\theta', \varphi')|^2 \sin \theta' d\theta' d\varphi'} = D_{0[m]} |\dot{f}_{[m]}(\theta, \varphi)|^2, \quad (2)$$

где индекс $[m]$ обозначает компоненту вектора напряженности электромагнитного поля в выбранном поляризационном базисе.

Именно эта величина количественно характеризует способность антенны концентрировать энергию при излучении определенной компоненты поля в данном направлении.

2. Коэффициент усиления антенны (КУ) в теории антенн рассматривается как самостоятельный параметр в связи с тем, что «именно эта величина легко поддается непосредственному измерению [4]» (причем это утверждение относится к максимальному КУ).

Коэффициент усиления антенны обычно рассчитывают, применяя известное соотношение

$$G(\theta, \varphi) = \eta_a D(\theta, \varphi), \quad (3)$$

где η_a – КПД, учитывающий только «тепловые» потери в самой антенне.

Экспериментально КУ определяют, используя известные методы измерения параметров антенн, например, метод сравнения (замещения), метод двух антенн или метод плоского экрана [3]. Полученный при этом результат можно считать максимальным значением КУ для m – й компоненты поля, который обозначим как $G_{0[m]}$.

Нетрудно заметить, что с помощью соотношений (1) или (2) и (3) (при наличии математических выражений для АХН) невозможно в точности определить парциальный коэффициент усиления $G_{0[m]}$ соответствующий результатам измерений. Можно только предполагать, что если в поле излучения антенны преобладает m – я компонента, то $G_{0[m]} \cong \eta_a D_0$. Однако при сложной поляризационной структуре поля излучения антенны такое предположение неверно.

3. Коэффициент полезного действия (КПД) антенно-фидерной системы. Известно [8], что коэффициент полезного действия – числовая характеристика энергетической эффективности какого-либо устройства. КПД определяется отношением **полезно использованной энергии** к суммарному количеству энергии, **переданному системе**.

В некоторых литературных источниках при формулировке определения КПД и КУ антенны используются такие понятия, как «мощность, которая к антенне подводится» и «полная мощность, подводимая к антенне» [2,3] или «полная входная мощность» [4], тогда как более корректным, по нашему мнению, является – «мощность, поступающая (или поступившая) в антенну» [8].

Наличие подобных разночтений может привести к неверным оценкам и выводам, в особенности в задачах ЭМС, где нужно четко определить величину коэффициента усиления антенн в произвольном направлении, вне рабочего диапазона частот и сложной поляризационной структуре излучаемых и принимаемых полей.

Рассмотрим подробнее определение понятия КПД антенны в режиме излучения. Пренебрегая эффектами возникновения и существования высших типов волн в линии питания антенны (фидере), приведем некоторые тривиальные определения и введем обозначения:

- $P_{\text{вх}}$ – полная мощность, подводимая к антенне, связанная с энергией волны, распространяющейся в фидере по направлению к антенне;
- $P_{\text{а}}$ – мощность, поступившая в антенну, связанная с энергией, расходуемой антенной (омические, диэлектрические, магнитные потери, потери на излучение);
- $P_{\text{от}}$ – мощность, связанная с энергией волны, распространяющейся в фидере по направлению от антенны.

Тогда можно записать

$$P_{\text{вх}} = P_{\text{от}} + P_{\text{п}} + P_{\Sigma} = P_{\text{от}} + P_{\text{а}},$$

при этом мощность, поступившая в антенну за единицу времени определяется выражением

$$P_{\text{а}} = (1 - |\dot{\rho}|^2) P_{\text{вх}} = \eta_{\text{от}} P_{\text{вх}},$$

где $\dot{\rho}$ – коэффициент отражения, равный отношению комплексных амплитуд отраженной и падающей волны в месте подключения питающей линии к антенне; $\eta_{\text{от}}$ – парциальный² КПД, учитывающий эффекты отражения от входа антенны.

Если обозначить через $P_{\text{и}}$ мощность, подаваемую от источника (генератора) в фидер, то мощность, поступившая в антенну, равна

$$P_{\text{а}} = \eta_{\text{ф}} \eta_{\text{от}} P_{\text{и}},$$

где $\eta_{\text{ф}}$ – парциальный коэффициент полезного действия, учитывающий только суммарные потери в фидерной линии.

Эта мощность, в свою очередь, расходуется на излучение и потери в антенне

$$P_{\text{а}} = P_{\Sigma} + P_{\text{п}}.$$

Парциальный коэффициент полезного действия антенны, учитывающий только мощность суммарных потерь $P_{\text{п}}$ в металлических, диэлектрических и магнитных материалах антенны определяется соотношением $\eta_{\text{св}} = P_{\Sigma} / (P_{\text{п}} + P_{\Sigma})$.

При определении КУ антенно-фидерного устройства именно произведение парциальных КПД рассматривают как КПД антенны в целом, учитывая его в (3) в виде

$$\eta_{\text{а}} = \eta_{\text{св}} \eta_{\text{ф}} \eta_{\text{от}}.$$

Однако, как отмечалось выше, при этом не принимается во внимание какова эффективность процесса излучения антенной волн определенной поляризационной структуры.

Напомним, что основное функциональное назначение передающей антенны – это именно излучение электромагнитных волн, т.е. антенна должна реализовывать процесс преобразования *энергии направляемых волн в энергию пространственных волн* одной из компонент волн **определенного вида поляризации** (обычно линейной либо круговой). Назовем его «полезным» излучением.

На самом деле всю энергию волн, излучаемых антенной объективно нельзя считать **полезно используемой**: некоторая ее часть излучается на неосновной поляризации, либо затрачивается на возбуждение и излучение поверхностных волн (как в микрополосковых конструкциях антенн). Подобные эффекты можно условно назвать «вредным» излучением.

Очевидна относительность понятия коэффициент полезного действия, если иметь в виду характеристику энергетической эффективности процессов формирования «полезного» либо «вредного» излучения.

Если антенна не содержит активных элементов, то термин «коэффициент полезного действия» будет определять эффективность указанного выше преобразования (эффективность излучения), не случайно в англоязычной терминологии КПД антенны – «efficiency».

При решении задач ЭМС одним из наиболее важных параметров, характеризующих антенные системы, является именно энергетическая эффективность процесса излучения (и приема) помех не только на основной, но и на ортогональной поляризации. При решении таких задач наиболее важно знать эти параметры вне рабочего диапазона частот, где соотношение между основной и кроссполя-

² Понятие парциального КПД (reflection efficiency [10]) часто применяют к самой антенне, хотя точнее будет отнести его к антенно-фидерной системе в целом.

ризаціонної компонентами поля суттєво змінюється.

Возможно, следует ввести новое понятие, четко определяющее эффективность процесса излучения поля определенной поляризаціонной структуры – **коэффициент поляризаціонной эффективности** (КПЭ) $\eta_{\Sigma[m]}$. Тогда процесс формирования «полезного» (либо «вредного») излучения для каждой антенны можно охарактеризовать отношением **мощности** излучения $P_{\Sigma[m]}$ поля m – й поляризации к **мощности, подводимой** к антенне

$$\eta_{\Sigma[m]} = P_{\Sigma[m]} / P_{\Sigma}.$$

Величину КПЭ можно вычислить, используя выражение

$$\eta_{\Sigma[m]} = \frac{\int_0^{2\pi} \int_0^{\pi} |\dot{f}_{[m]}(\theta', \varphi')|^2 \sin \theta' d\theta' d\varphi'}{\int_0^{2\pi} \int_0^{\pi} |\dot{f}(\theta', \varphi')|^2 \sin \theta' d\theta' d\varphi'} \quad (4)$$

где $|\dot{f}(\theta, \varphi)|$ и $|\dot{f}_{[m]}(\theta, \varphi)|$ – это ненормированные амплитудные характеристики направленности антенны.

Воспользовавшись формулами (4) и (2), можно получить аналитическое выражение для парциального коэффициента усиления антенны $G_{\Sigma[m]}$ для m – й компоненты поля, излучаемого антенной

$$G_{\Sigma[m]}(\theta, \varphi) = \eta_{\Sigma[m]} D_{[m]}(\theta, \varphi) = \frac{4\pi |\dot{f}_{[m]}(\theta, \varphi)|^2}{\int_0^{2\pi} \int_0^{\pi} |\dot{f}(\theta', \varphi')|^2 \sin \theta' d\theta' d\varphi'} \quad (5)$$

С учетом этого КУ антенны по основной или кроссполяризаціонной компоненте поля для произвольного направления можно определить, зная АХН антенны и КПЭ излучения определенные для соответствующей компоненты поля

$$G_{[m]}(\theta, \varphi) = \eta_a \eta_{\Sigma[m]} D_{[m]}(\theta, \varphi) = \eta_a G_{\Sigma[m]}(\theta, \varphi). \quad (6)$$

Из этого выражения следует, что именно значение $G_{\Sigma[m]}(\theta, \varphi)$ для основной компоненты поля в направлении главного лепестка ДН соответствует упомянутому выше значению $G_{0[m]}$, определяемому в процессе измерений.

Руководствуясь принципом взаимности аналогичное понятие, которое будет характеризовать эффективность приема поля определенной поляризаціонной структуры, имеет смысл применить и в отношении приемной антенны.

Суммарный КПД антенны $\eta_{\Sigma a[m]}$ в режиме «полезного» или «вредного» излучения (приема) для m – й поляризации поля определяется, как

$$\eta_{\Sigma a[m]} = \frac{P_{\Sigma[m]}}{P_{\text{вх}}} = \frac{\eta_{\text{от}} \eta_{\Sigma[m]} P_{\Sigma}}{P_a} = \eta_{\text{от}} \eta_{\sigma\varepsilon} \eta_{\Sigma[m]}. \quad (7)$$

Предлагается именно в таком виде применять определение понятия КПД антенн при определении ее коэффициента усиления, см. формулу (3).

Наконец отметим, что коэффициент поляризаціонной эффективности излучения $\eta_{\Sigma[m]}$, также как и парциальный КПД $\eta_{\text{от}}$, главным образом определяют частотную зависимость КУ всей антенно-фидерной системы, поскольку $\eta_{\sigma\varepsilon}$ и $\eta_{\text{ф}}$ обычно весьма слабо зависят от частоты.

Проиллюстрируем на нескольких примерах отличия, при вычислении величины коэффициента усиления антенны в его классической формулировке (по полному полю) и коэффициента усиления по полю m -й поляризации.

Полагая, что поле, излучаемое антенной, является монохроматическим и полностью поляризованным [9], в дальней зоне его можно представить как совокупность компонент в линейном

$\vec{E} = \vec{e}_\theta E_\theta + \vec{e}_\varphi E_\varphi$, либо круговом $\vec{E} = \vec{e}_L E_L + \vec{e}_R E_R$, ортонормированном поляризационном базисе, где \vec{e} – соответствующий орт, индексы L и R означают принадлежность к левой либо правой круговой поляризации.

Угловые зависимости парциальных (см. выражение (7)) КУ антенны (для линейных и круговых поляризационных компонент) определялись на основе компьютерного моделирования с использованием современного программного пакета «ФЕКО» [10] в котором для расчета пространственных и импедансных характеристик антенн и антенных систем используются строгие электродинамические методы.

Рассчитывались характеристики плоской двухзаходной архимедовой спиральной антенны с пятью витками в режиме противофазного возбуждения, расположенной в свободном пространстве в плоскости $\theta = 0$ с центром в начале сферической системы координат. Максимальный радиус спирали $R_{\max} = 10$ мм, минимальный радиус 1 мм.

Графики, изображенные на рис. 1, иллюстрируют отличия зависимостей величин парциальных КУ $G_\Sigma[m]$, определенных в линейном и круговом поляризационном базисе от угловой координаты при $\varphi = 0$.

Для сравнения там же показана аналогичная зависимость КУ G_Σ в классической интерпретации этого понятия (см. выражения (3) и (5)), т.е., учитывающая суммарную эффективность излучения.

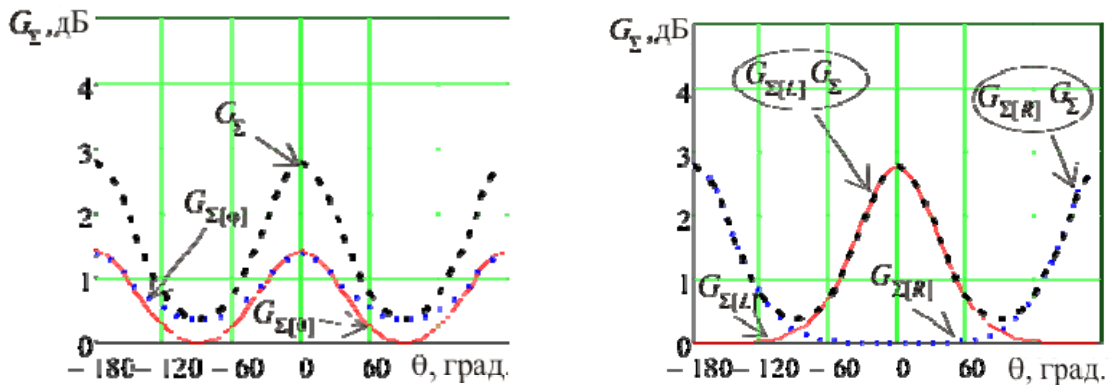


Рисунок 1 – Угловые зависимости коэффициента усиления архимедовой спирали

Отметим, что для круго-поляризованных компонент отличия G_Σ от $G_{[m]}$ становятся заметными лишь вблизи плоскости спирали $|\theta| \cong \pi/2$, в то время как для линейно-поляризованных компонент существенные отличия наблюдаются при всех углах.

Следовательно, в задачах анализа условий ЭМС, когда рассматривается излучение (либо прием) вне направления максимального излучения, выбор значений коэффициента усиления антенн в его классической интерпретации приведет к заметной ошибке.

Может показаться, что при известном отношении взаимно ортогональных компонент поля

$$p(\theta, \varphi) = \frac{|\dot{f}_{\perp\perp}(\theta, \varphi)|^2}{|\dot{f}_{\parallel\parallel}(\theta, \varphi)|^2}$$

и наличии данных об угловой зависимости суммарного КНД можно вычислить парциальный КУ. Однако это не так, поскольку для любой из компонент поля

$$D_{[m]}(\theta, \varphi) \neq p(\theta, \varphi)D(\theta, \varphi).$$

Проанализировать зависимости КУ от длины волны можно на модели архимедовой спиральной, дополненной плоским экраном радиусом $1,5R_{\max}$, расположенным параллельно плоскости спирали. На рис. 2 изображены угловые зависимости КУ для такой спиральной антенны при $\varphi = 0$ и расстоянии между спиралью и экраном $h = 0,25\lambda_0$ ($\lambda_0 = 30$ мм).

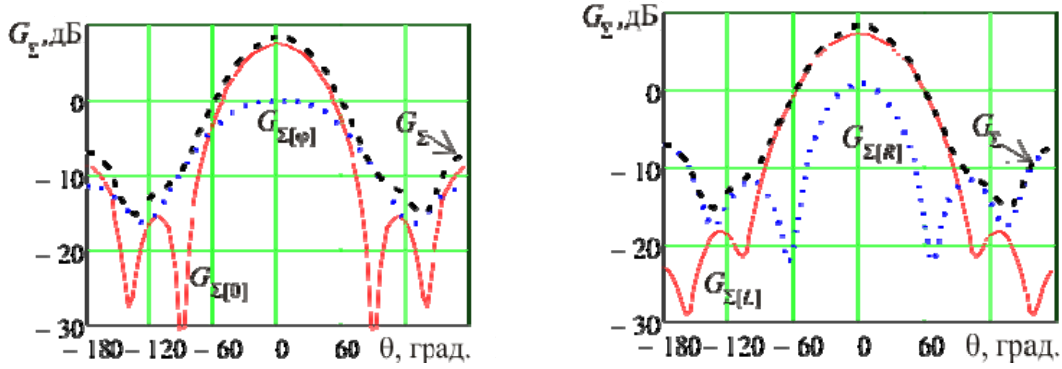


Рисунок 2 – Угловые зависимости КУ архимедовой спирали с экраном

На рис. 3 показаны зависимости коэффициентов усиления при изменении относительного расстояния h/λ , рассчитанные вне осевого направления. Поскольку свойства самого спирального излучающего элемента такой антенны изменяются сравнительно мало, в данном случае именно существенная зависимость КПЭ от частоты ведет к изменению соотношений между коэффициентами усиления определенными для различных поляризационных компонент.

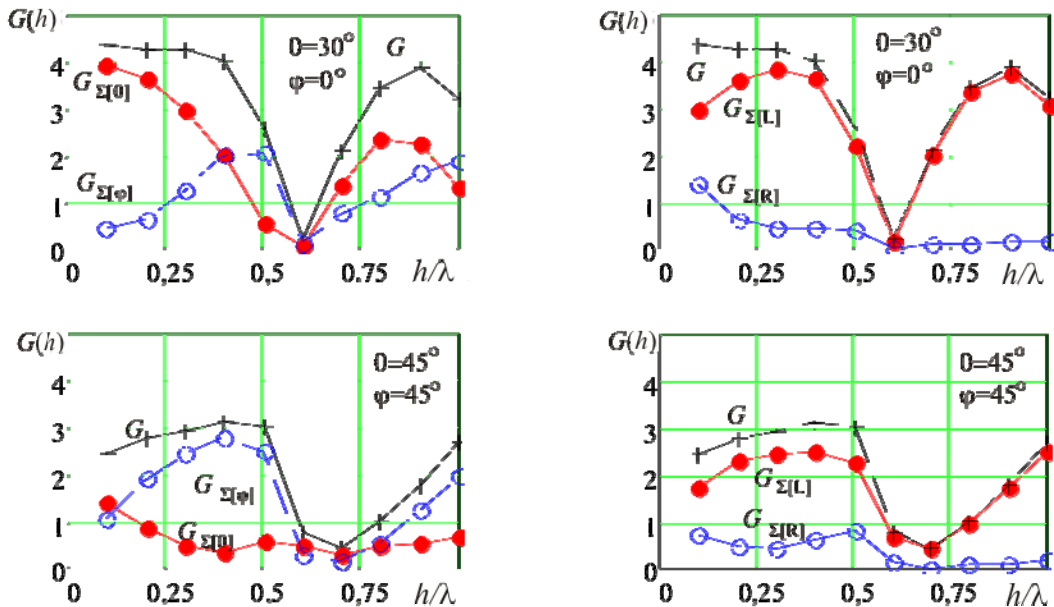


Рисунок 3 – Зависимости парциальных коэффициентов усиления от расстояния до экрана

Аналогично проявляется влияние частотной зависимости, о чем, в частности, можно судить по графикам парциальных коэффициентов усиления, рассчитанных в осевом направлении при $h/\lambda_0 = 0,25$, которые приведены на рис. 4.

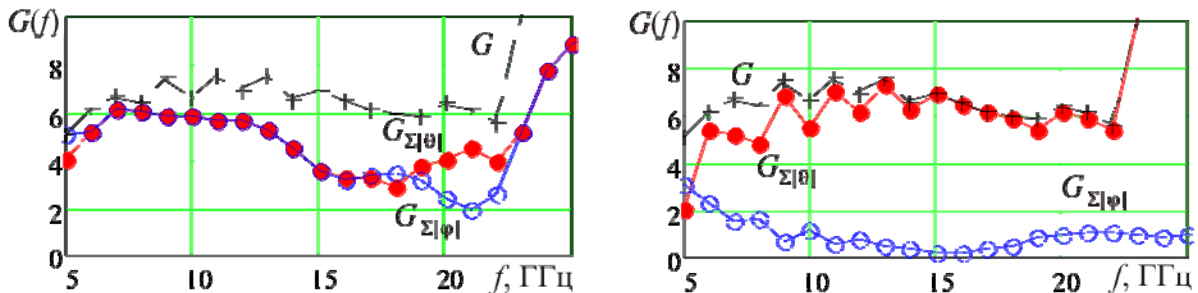


Рисунок 4 – Зависимости парциальных коэффициентов усиления от частоты

Выводы. Из сказанного выше следует, что понятиям «коэффициент полезного действия» и «коэффициент усиления» антенны можно придавать различный смысл в зависимости от анализируемой ситуации.

В задачах анализа и обеспечения ЭМС [11] необходимо учитывать сложную поляризационную структуру анализируемых полей особенно применительно к антенным системам с неплоской рабочей поверхностью, с излучателями в виде спиралей, диэлектрических стержней, круглых металлических волноводов и рупоров, вне главного лепестка их ДН и вне рабочего диапазона частот [2,12].

Например, в задачах ЭМС при произвольной взаимной ориентации антенн источника и рецептора помех говорить о корректности расчетов использующих понятие КПД и КУ в традиционной формулировке можно только, если поляризационная структура излучаемого (и принимаемого) антеннами поля во всех направлениях одинакова.

В реальных условиях подобная идеализация допустима лишь отчасти: в узком секторе углов (возможно в пределах главного лепестка ДН), в пределах ограниченного участка рабочего диапазона частот каждой из антенн.

В общем случае при расчете мощности m -й компоненты поля помехи на входе приемника $P_{\text{пр}[m]}$ более корректно определять коэффициент полезного действия антенн, учитывая предложенное понятие КПЭ, вычисляя его значение в соответствии выражением (4), и, соответственно, коэффициенты усиления антенно-фидерного устройства, в соответствии выражением (6). Например, при анализе ЭМС для случая распространения в свободном пространстве мощность помехи на входе приемника определяется из соотношения

$$P_{\text{пр}[m]}(\theta_R, \varphi_R) = P_a G_{[m]}^{(T)}(\theta_T, \varphi_T) \cdot G_{[m]}^{(R)}(\theta_R, \varphi_R) \left(\frac{1}{L_{\text{св}}} \right),$$

где $G_{[m]}^{(T)}$ и $G_{[m]}^{(R)}$ – парциальные коэффициенты усиления антенно-фидерных систем в режиме излучения и приема, определяемые для m -й поляризационной структуры поля, $L_{\text{св}}$ – множитель ослабления. Здесь сферические угловые координаты локальных систем, связанных с антенной источника помех либо с антенной рецептора помех, определяющие направления излучения и приема помех, обозначены, как θ_T, φ_T и θ_R, φ_R .

Основываясь на результатах данной работы можно указать возможное направление дальнейших исследований, таких как решение задач ЭМС с учетом особенностей парциальных коэффициентов усиления сложных антенных систем, например, антенных решеток.

Литература

1. Антенно-фидерные устройства / Ерохин Г.А., Чернышев О.В., Козырев Н.Д., Кочержевский Г.Н. – М.: Горячая линия – Телеком, 2004. – 491 с.
2. Жук М.С. Проектирование антенно-фидерных устройств / М.С.Жук, Ю.Б. Молочков. – М.-Л.: Энергия, 1966. – 648 с.
3. Фрадин А.З. Измерения параметров антенно-фидерных устройств / А.З. Фрадин Е.В. Рыжков. – М.: Связьиздат, 1962. – 316 с.
4. Сазонов Д.М. Антенны и устройства СВЧ / Д.М. Сазонов. – М.: Высш. шк., 1988. – 432 с.
5. Balanis C. A. Modern antenna handbook / C. A. Balanis. – John Wiley & Sons, Canada, 2008. – 1680 с.
6. Пистолькорс А.А. Антенны / А.А. Пистолькорс. – М.: ОГИЗ, 1946. – 479 с.
7. Англо-русский словарь по антенно-волноводной технике / сост. Г.Б. Резников. – М.: Советская энциклопедия, 1973. – 431 с.
8. Прохоров А.М. Физический энциклопедический словарь / А.М. Прохоров. – Советская энциклопедия, 1984. – 944 с.
9. Канарейкин Д.Б. Поляризация радиолокационных сигналов / Канарейкин Д.Б., Павлов Н.Ф., Потехин В.А. – М.: Сов. радио, 1966. – 440 с.
10. Банков С.Е. Расчет излучаемых структур с помощью ФЕКО / С.Е. Банков, А.А. Курушин. – М.: ЗАО «НПП «Родник», 2008. – 245 с.
11. Виноградов Е.М. Электромагнитная совместимость радиоэлектронных средств / Виноградов Е.М., Винокуров В.И., Харченко И.П. – Л.: Судостроение, 1986. – 264 с.
12. Жук М.С. Проектирование линзовых, сканирующих, широкодиапазонных антенн и фидерных устройств / М.С.Жук, Ю.Б. Молочков. – М.: Энергия, 1973. – 448 с.