



УДК 621.396.67

А. В. Корнейко, канд. техн. наук, **Т. А. Иваник**
Ин-т специальной связи и защиты информации
Национального технического университета Украины «КПИ»
(Украина, 01011, Киев, ул. Московская, 45/1,
E-mail: I_N_V_E_N_T_@UKR.net.)

Частотно-независимые антенны и их практическая реализация

(Статью представил д-р техн. наук В. Г. Тоценко)

Рассмотрены теоретические основы проектирования частотно-независимых антенн, примеры их практической реализации, а также электрические параметры антенных устройств. Приведена классификация радиотехнических средств по способу излучения, по полосе частот, формула и нормы для определения класса антенной техники. Определена роль и место антенны в радиотехническом комплексе.

Розглянуто теоретичні основи проектування частотно-незалежних антен, приклади їхньої практичної реалізації, а також електричні параметри антенних пристроїв. Наведено класифікацію радіотехнічних засобів по способу випромінювання, по смузі частот, формула та норми для визначення класу антенної техніки. Визначено роль і місце антени в радіотехнічному комплексі.

Ключевые слова: частотно-независимые антенны, принцип электродинамического подобия, электродинамический принцип самодополнительности, широкодиапазонность.

Использование частотно-независимых антенн в различных радиотехнических системах до настоящего времени остается актуальнейшей задачей для разработчиков антенной техники. Более того, наблюдается повышенный интерес потребителей не просто к частотно-независимым антеннам (ЧНА), а к ЧНА, которые имеют компактные массогабаритные показатели, позволяют упростить работу радиоаппаратуры в широкой полосе частот и уменьшить количество потраченного времени, выделяемого на подключение приемно-излучающего устройства в случае использования узкополосных литерных антенн.

В мире современных технологий вопрос времени связан со многими очень важными проблемами различного характера. Поэтому, решая вопрос о количестве потраченного времени, например при сканировании эфира в полосе частот от 30 МГц до 2 ГГц, пользователь ЧНА получает

множество преимуществ в связи с возрастанием эффективности радиотехнического комплекса.

Известно, что антенна является неотъемлемой частью любого радиотехнического устройства, во многом определяя параметры и эффективность устройства в целом. Современный информационный бум не оставил без внимания и радиосвязь, а следовательно, и антенную технику. Одним из направлений развития антенной техники остается разработка частотно-независимых (сверхширокополосных) антенных устройств, предназначенных для решения различных технических задач, от передачи сверхширокополосных сигналов до сканирования эфира в широкой полосе частот. Именно поэтому последнее время ведутся поиски новых методов проектирования компактных ЧНА, совершенствуется технология их изготовления, решен ряд важных проблем теории частотно-независимых антенн.

Частотно-независимые антенны, принципы их работы и проектирования. Возможность построения широкодиапазонных антенн основана на одном из положений теории излучения, в соответствии с которым, электрические характеристики излучающей системы определяются не только ее конфигурацией, но и соотношением между ее размерами и рабочей длиной волны. Следствием этого положения является принцип электродинамического подобия, позволяющий широко применять в антенной технике электрическое моделирование. Поэтому для получения частотно-независимых антенн, т. е. антенн с постоянными во всем частотном диапазоне характеристиками, необходимо так выбирать их форму, чтобы отношение их размеров к длине волны не зависело от частоты. Последнее может быть выполнено только в бесконечных структурах, форма которых зависит от угловых координат (принцип углов). Однако и конечные излучающие системы достаточных размеров, выполненные на основе бесконечных частотнонезависимых структур, оказываются весьма широкодиапазонными. Основы теории и техники ЧНА были заложены в работах У. Рамсеема и Д. Дайсона и нашли развитие в многочисленных работах по данной тематике [1, 2].

Принцип электродинамического подобия состоит в том, что основные параметры антенны (диаграмма направленности (ДН) и входное сопротивление) остаются неизменными, если изменение длины волны λ сопровождается прямо пропорциональным изменением линейных размеров активной области антенны. При соблюдении данного условия антенна может быть частотно-независимой в неограниченном диапазоне волн. Однако размеры излучающей структуры конечны и рабочий диапазон волн любой антенны также ограничен.

Кроме упомянутого принципа электродинамического подобия при разработке ЧНА на практике широко используется электродинамический принцип самодополнительности [3]. Он заключается в параллельном соеди-

нении электрического (дипольного) и магнитного (щелевого) излучателей одинаковой пространственной конфигурации. Следует также заметить, что применение высококачественных приемников с высокой чувствительностью при разработке ЧНА обусловлено отсутствием жестких требований к постоянству диаграммы направленности приемных антенн. Это значительно облегчает задачу построения приемных ЧНА [4].

Большинство задач, решаемых с помощью радиотехнических комплексов, определяют специфику эксплуатации антенных устройств и, как следствие, принципы проектирования антенн. На этапе разработки ЧНА необходимо учитывать специфические требования, обусловленные радиотехническим устройством, областью его применения, условиями эксплуатации и другими факторами.

Следуя основным принципам проектирования радиотехнических устройств, представим алгоритм разработки ЧНА.

1. Составление задания на проектирование антенны, включающее:
 - цель проектирования антенного устройства;
 - задачи, которые будут решаться с помощью ЧНА;
 - формулировка требований, предъявляемых к устройству для решения поставленных задач.
2. Разработка проектной документации на основе современных данных о развитии антенной техники в выбранном направлении.
3. Анализ и обоснование принятых решений.

Из изложенного следует, что требования к внутренним и внешним характеристикам антенного устройства необходимо формировать исходя из условий, в которых антенна будет использоваться. Поэтому при проектировании антенны прежде всего необходимо изучить все особенности ее применения, после чего формировать требования к ней.

При разработке приемных ЧНА нет необходимости использовать специальную теорию приемных антенн. Достаточно применить принцип взаимности, воспользоваться параметрами антенны в режиме передачи. Однако, поскольку уровень принимаемого сигнала соизмерим с мощностью различных шумов, мощность на выходе приемной антенны определяется с помощью специфического параметра — шумовой температуры. Тем самым осуществляется эквивалентная замена всех шумов тепловыми шумами внутреннего сопротивления антенны [5, 6].

Классификация ЧНА. Для классификации радиотехнических средств и сигналов по полосе частот, которые они занимают, введено общее определение относительной полосы частот: $\eta = (f_{\text{в}} - f_{\text{н}}) / (f_{\text{в}} + f_{\text{н}})$, где $f_{\text{в}}$ и $f_{\text{н}}$ — верхняя и нижняя границы рабочего диапазона частот. Для узкополосных устройств $\eta \leq 0,01$, для широкополосных — $0,01 \leq \eta \leq 0,25$, для ЧНА $0,25 < \eta \leq 1$. Такую же классификацию используют и производители антенной техники [7].

Существует еще один признак классификации антенных устройств, который необходимо учитывать при разработке ЧНА. По способу излучения (приема) все антенны можно разделить на три основные группы:

1) линейная антенна (провод или система проводов, длина которых значительно превышает их поперечный размер);

2) апертурная антенна (наличие апертуры, на которой происходит трансформация энергии);

3) антенна поверхностной волны (в механизме излучения основную роль играет поверхностная волна, которая распространяется вдоль антенны и участвует в процессе излучения) [8].

Примеры практической реализации. Разновидностью ЧНА является вибраторная антенна с реактивными включениями. Это одна из простейших антенн с емкостными нагрузками: внутрь электрической капсулы длиной λ_n симметрично относительно середины вставлены проводящие стержни, между которыми размещены электрические вставки, во взаимодействии со стержнями образующие определенную емкость отрицательную нагрузку, зависящие от частоты. Для достижения режима, близкого к режиму бегущей волны, вставки монтируются на расстоянии от концов антенны, которые кратны непарному числу четвертой части λ ($\lambda_{в 6/4}$, $\lambda_{в 3/4}$, $\lambda_{в 5/4}$, $\lambda_{в 7/4}$) [9].

В связи с постоянно возрастающей потребностью в мобильности подвижных объектов, которые оборудованы средствами связи в диапазоне УКВ, в качестве ЧНА с относительной полосой частот $\eta \leq 0,8$ широкое применение нашли несимметричные конические вибраторы (НКВ). Конические вибраторы могут быть объемными или плоскостными. В зависимости от угла при вершине конуса различают узкие, средние и широкие НКВ. Несимметричные конические вибраторы выполняются с шунтами и без шунтов. На рис. 1 показан общий вид объемного НКВ с шунтами и без шунтов. Введение в конструкцию НКВ дополнительных проводников (шунтов) позволяет уменьшить высоту H излучателя до значений, равных или меньших $0,1\lambda_{max}$, где λ_{max} — максимальная рабочая длина волны.

Наличие шунтов не вносит искажений в характеристику направленности НКВ и позволяет существенно улучшить согласование в области нижних частот. На рис. 2 показан общий вид плоскостного НКВ без шунтов.

В [10] представлены частотные характеристики по входному сопротивлению двух типов НКВ — объемных и плоскостных, с шунтами и без шунтов. Из приведенных данных следует, что по согласованности плоскостные НКВ существенно уступают объемным. Влияние шунтов в конструкции проявляется одинаково, т. е. наблюдается расширение рабочей полосы в сторону нижних частот. При $2\psi = 120^\circ$ в объемном НКВ без

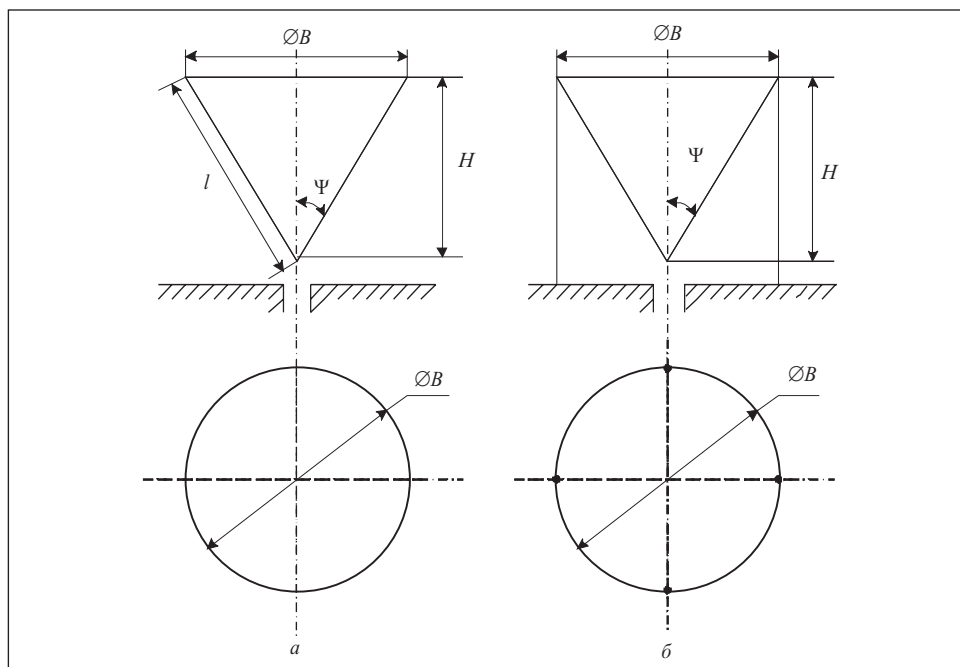


Рис. 1. Общий вид объемных НКВ с шунтами (а) и без шунтов (б)

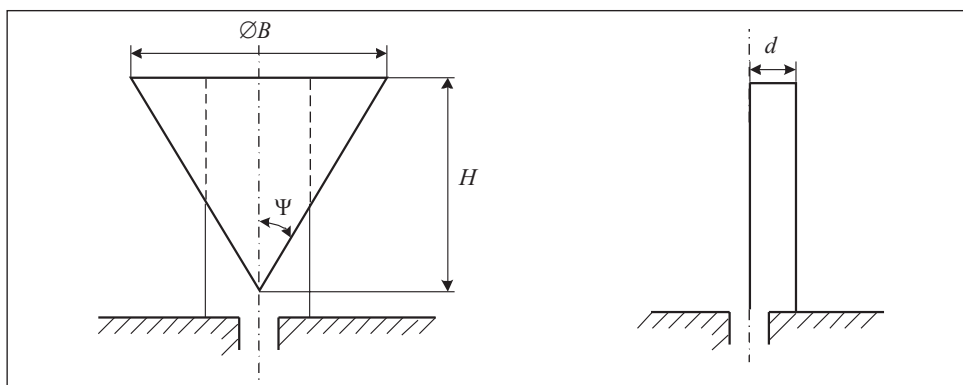


Рис. 2. Общий вид плоскостного НКВ без шунтов

шунтов $H/\lambda_{\max} = 0,126$, в объемном НКВ с шунтами $H/\lambda_{\max} = 0,075$. Выигрыш по высоте составил 1,68.

Конические вибраторы, расположенные над проводящей плоскостью, точка питания которых лежит в этой плоскости (см. рис. 1), в зависимости от угла при вершине 2Ψ имеют различные диаграммы направленности в диапазоне рабочих частот и могут быть разделены на три группы. Для

узких НКВ с углом при вершине 2Ψ от 0 до 50° характерно сужение их ДН в области средних частот (при длине плеча $\ell \approx (0,4 \dots 0,5) \lambda$) и провал на высоких частотах. Средние НКВ ($2\Psi = 50^\circ \dots 90^\circ$) в широком диапазоне частот (до $k\ell = 4$) сохраняют дипольную ДН в вертикальной плоскости, а на более высоких частотах происходит дифракционная неравномерность при углах, близких к зениту. У широких НКВ ($2\Psi > 90^\circ$) ДН расширяется на средних и сужается на высоких частотах.

Результаты анализа внешних характеристик объемных НКВ, проведенного в полосе частот с коэффициентом перекрытия $K_{\Pi} = 1 : 9$, свидетельствуют о том, что практически ни одна из конструкций НКВ не удовлетворяет требованиям по стабильности ДН, а следовательно, и коэффициента направленного действия (КНД) в полосе рабочих частот.

В работе [11] рассмотрены технические решения по реализации НКВ с улучшенными внешними характеристиками. Общий вид таких антенных устройств показан на рис. 3. Элементом новизны является вынесенная точка возбуждения, причем отражающая поверхность (экран) имеет коническую форму. В результате расчетов установлено, что для узких НКВ с вынесенной точкой возбуждения в полосе частот при $K_{\Pi} = 1 : 9$ наблюдается стабильность КНД. Для широких НКВ с вынесенной точкой возбуждения в полосе частот $h_d = \text{const}$, где h_d — действующая высота антенны, т. е. с возрастанием частоты значение КНД линейно увеличивается. Практически режим $h_d = \text{const}$ сохраняется в диапазоне с перекрытием 1 : 3.

Анализ электрических характеристик. На рис. 4 представлены графики зависимости КНД для узкого и широкого НКВ с вынесенной точкой возбуждения. На основании работ [10, 11] по исследованию электрических характеристик НКВ установлено, что минимальная высота для различных типов НКВ составляет: для объемных НКВ с шунтами — $(0,0075 \dots 0,11) \lambda_{\text{max}}$; для плоскостных НКВ с шунтами — $(0,12 \dots 0,14) \lambda_{\text{max}}$, при этом согласованность обеспечивается с помощью фидерной линии (75 Ом) в полосе частот при $K_{\Pi} = 1 : 9$. Если введение НКВ в конструкцию улучшает внутренние характеристики излучателя, то смещение точки его возбуждения стабилизирует внешние характеристики, что наглядно представлено на рис. 5.

При расположении антенны на борту подвижного объекта желательно обеспечить минимальную высоту антенны, сохраняя необходимую согласованность с фидером. В ходе экспериментальных исследований были рассмотрены некоторые способы снижения высоты НКВ до $0,1 \lambda_{\text{max}}$ и менее. Уменьшение размеров достигалось введением в конструкцию антенны шунтов и верхних емкостей в виде горизонтальных металлических пластин. Нижнюю границу рабочего диапазона антенны определяли по значению частоты $f_{\text{min}} (\lambda_{\text{max}})$, при которой в фидере коэффициент

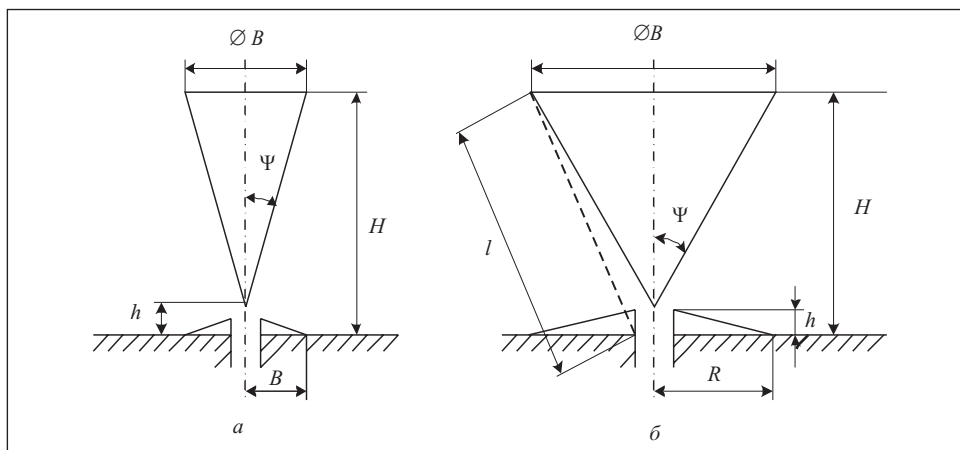


Рис. 3. Несимметричные конические вибраторы с улучшенными внешними характеристиками: а — узкий НКВ; б — широкий НКВ

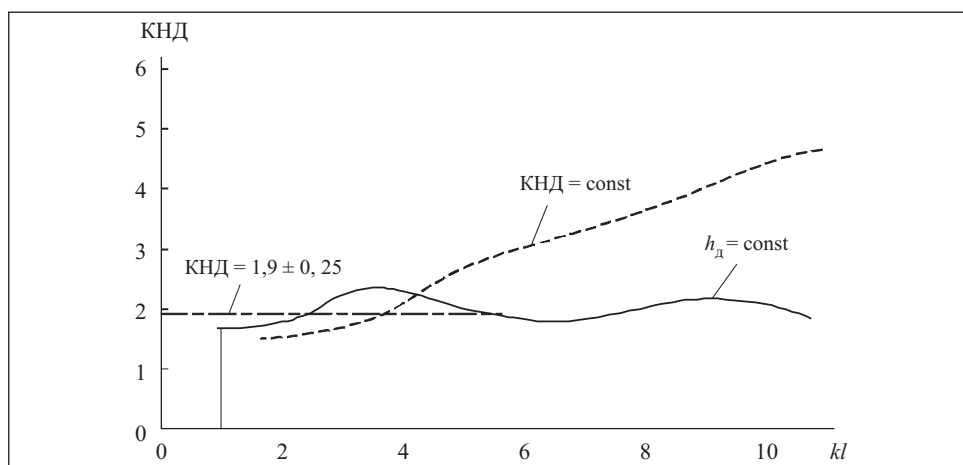


Рис. 4. Графики зависимости КНД узкого и широкого НКВ с вынесенной точкой возбуждения

бегущей волны (КБВ) равен 0,4. В качестве фидера использовали отрезок коаксиального кабеля длиной 2м (75 Ом).

Наиболее широкодиапазонными антеннами (по входному сопротивлению), как известно, являются объемные вибраторы, особенно конические, а также самодополнительные антенны, у которых металлическая часть и щелевая аналогичны и дополняют одна другую [12]. На практике в качестве низкопрофильной антенны широко применяется согнутый петлевой вибратор. Как показано на рис. 6, сдвиг его рабочей полосы в область меньших частот можно обеспечить заменой горизонтальной петли L



Рис. 5. Внешние характеристики НКВ: *a* — узкий при $2\Psi = 40^\circ$; *b* — средний при $2\Psi = 80^\circ$; *c* — широкий при $2\Psi = 120^\circ$; *z* — узкий при $2\Psi = 42^\circ$ с вынесенной точкой возбуждения; *d* — широкий при $2\Psi = 98^\circ$ с вынесенной точкой возбуждения

вибратора металлической пластиной. Размеры антенны (в миллиметрах): $H = 60$, $d = 20$, $b = 34$, $A = 80$. Для варианта *I* $H = 0,069 \lambda_{\max}$, для варианта *IV* $H = 0,086 \lambda_{\max}$, т. е. выигрыш по высоте равен 1,25.

На рис. 7 представлены результаты измерения низкопрофильных антенн высотой менее $0,1\lambda_{\max}$. Малая высота антенны обеспечена применением широких скрещенных *M*-образных самодополнительных структур в сочетании с емкостной крышевой нагрузкой. Размеры антенн относительно длины волны составляют $A = 0,185\lambda_{\max}$, $H = 0,052\lambda_{\max}$ (антенна 1); $a = 0,23\lambda_{\max}$, $H = 0,062\lambda_{\max}$ (антенна 2).

В качестве направленной была исследована рамочная антенна (рис. 8, *a*), состоящая из пластинчатого рефлектора и двух параллельно включенных квадратных рамок со стороной *a*. Поскольку средний проводник (с точками питания *BC*) является общим для обеих рамок, габаритные размеры антенны уменьшаются и составляют приблизительно 0,7 размер *a* известной зигзагообразной антенны.

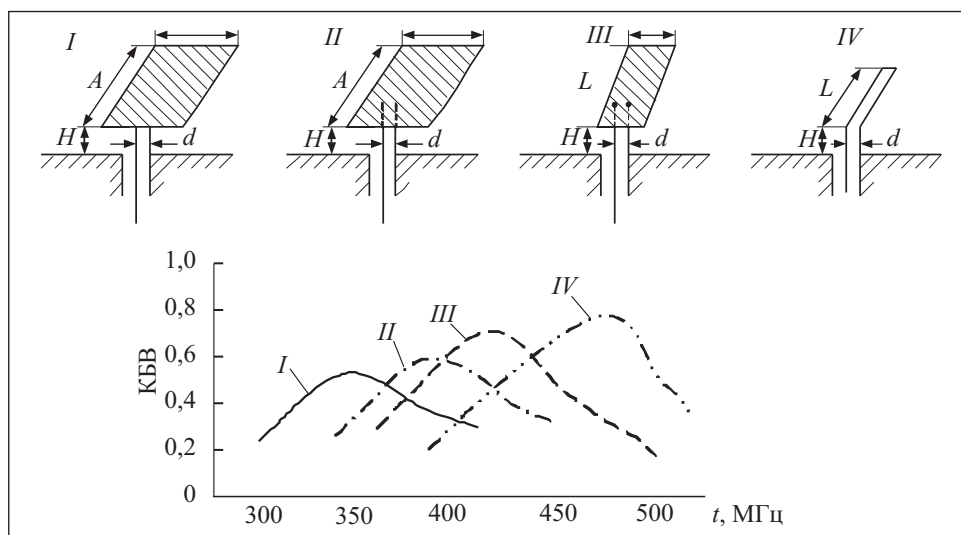


Рис. 6. Графики зависимости КВВ от горизонтальной петли L вибратора

Форма пластинчатой рамки (рис. 8, б) отработана экспериментально для получения хорошего согласования антенны с 75-омным коаксиальным фидером в двукратном диапазоне частот при КВВ $\geq 0,6$. В качестве рефлектора использован сплошной экран, на котором рамка с точкой нулевого потенциала $0-0$ крепилась с помощью металлических стоек. Фидер введен в антенну в одной из этих точек. Рамка с рефлектором, размещенная над экраном, выполнена из листовой латуни, а экраны — из дюралюминия. По результатам измерений (рис. 8, в) установлено, что в диапазоне частот 500...1000 МГц КВВ $\geq 0,5$. Расстояние от центра антенны до горизонтального экрана составляет $h = 0,18\lambda_{\max}$, где $\lambda_{\max} = 60$ см.

Характеристика направленности конической шунтовой антенны в горизонтальной плоскости в четырехкратном диапазоне частот практически круговая, за исключением частоты $4f_{\min}$, где неравномерность поля составляет 0,7 максимального значения; у плоскостных шунтовых вибраторов на частоте $3f_{\min}$ неравномерность характеристики в плоскости H достигает значения 0,6.

Таким образом, установлено, что минимальные высоты исследованных низкопрофильных антенн составляют от $0,075$ до $0,11\lambda_{\max}$, плоскостных шунтовых вибраторов — от $0,12$ до $0,14\lambda_{\max}$. В [12] предложена направленная низкопрофильная рамочная антенна с высоким согласованием, удаление нижнего края которой от борта составляет $0,06\lambda_{\max}$, высота антенны с рефлектором $0,4\lambda_{\max}$.

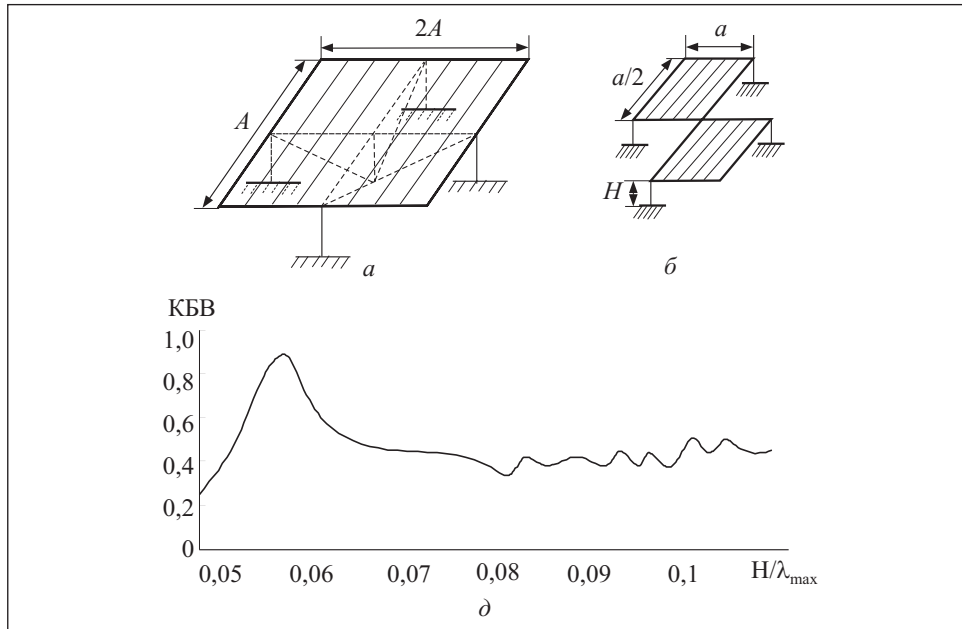


Рис. 7. Схемы и результаты измерения низкопрофильных антенн

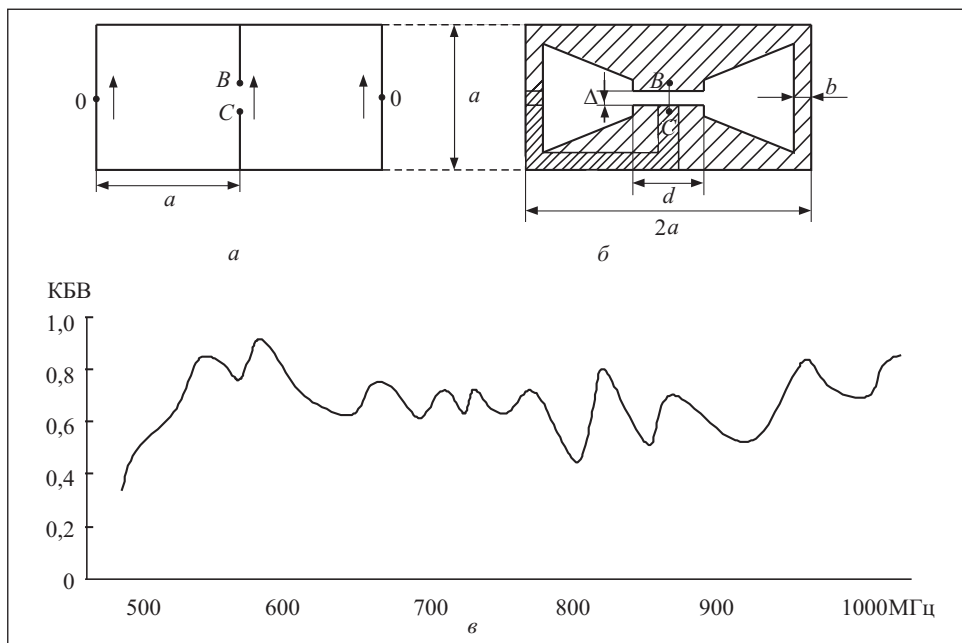


Рис. 8. Схема и результаты измерений рамочной антенны

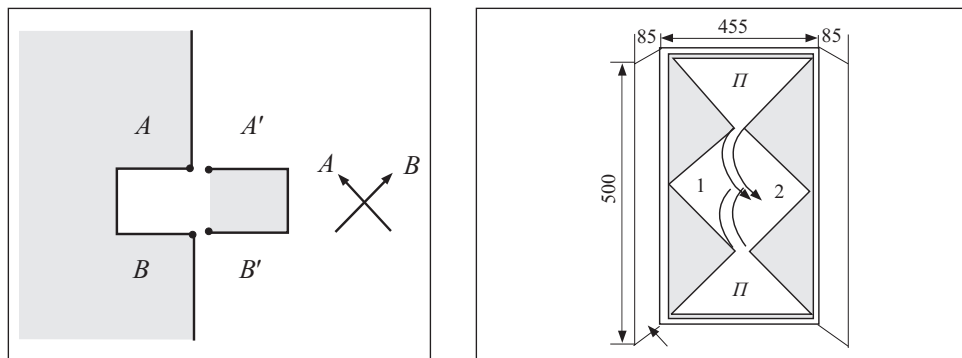


Рис. 9. Схема реализации принципа самополнтельности на основе квадрата

Рис. 10. Схема антенной решетки на основе СА

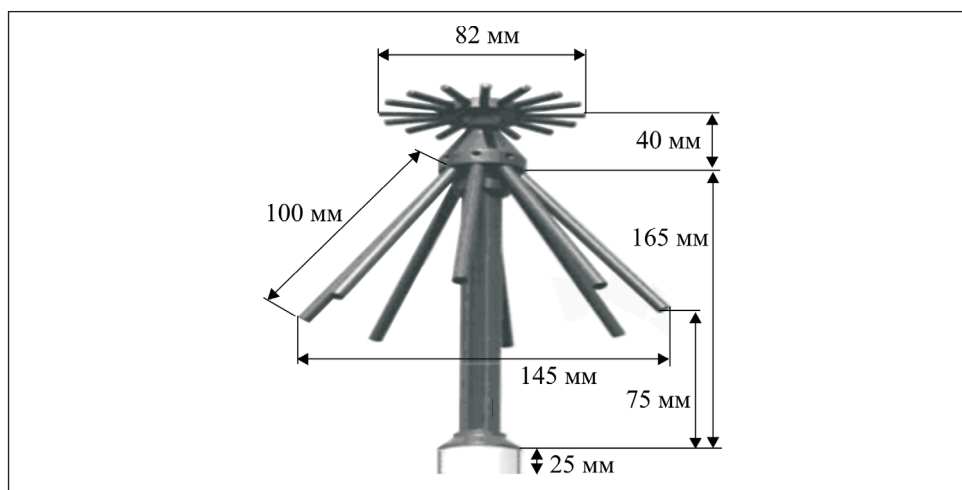


Рис. 11. Дисконусная антенна с плоским верхним диском

Реализация принципа самополнтельности схематически представлена на рис. 9, где модель самополнтельной антенны (СА) построена на основе квадрата. При возбуждении в точках AA' излучается электромагнитная волна линейной поляризации A , а при возбуждении в точках BB' — волна линейной поляризации B . В случае круговой поляризации используется плоская расходящаяся спиральная антенна.

Уникальным свойством СА является неизменность их свойств во всей полосе частот, в которой сохраняется принцип самополнтельности. Входное сопротивление СА является активным и составляет 188,4 Ом. Как известно, волновое сопротивление свободного пространства также активное и составляет 377 Ом. Несложно определить, что постоянный коэффи-

циент отражения для СА составляет: по напряжению — $1/3$, по мощности — $1/9$ (коэффициент стоящей волны равен двум). Такая незначительная рас-согласованность является следствием увеличения рабочей полосы частот. При наличии отражателя, применяемого для обеспечения однонаправленного излучения, самодополнительность частично нарушается. Поэтому рабочая полоса частот практических конструкций СА ограничена.

СА используют в различных диапазонах вплоть до миллиметровых волн. В метровом и КВ диапазонах вместо сплошных металлических поверхностей можно применять проволочные сетчатые треугольные и квадратные структуры, подвешенные над поверхностью земли, используемой как зеркальный отражатель, что совместно образует полосный самодополнительный диполь.

Наибольший интерес представляют СА конечных размеров в качестве излучателей широкополосных периодических антенных решеток (рис. 10). Для расширения рабочей полосы вместо верхней и нижней перемычек Π можно установить два петлевых вибратора, настроенных на нижние частоты [4].

Известны так называемые дискоконусные антенны (рис. 11) с вертикальной поляризацией и всенаправленной по азимуту диаграммой направленности, в том числе и их модификации с плоским верхним диском для прижатия ДН к поверхности земли. Антенна такого типа прилагается в качестве сменной к современному сканирующему приемнику AR8200 фирмы AOR (Япония) с рабочим диапазоном 0,5...1500 МГц. По данным фирмы-изготовителя эта дискоконусная антенна перекрывает полосу 700—3000 МГц, что является уникальным достижением в антенной технике [13].

Выводы. В настоящее время используются литерные антенны для подключения и настройки. Эти действия усложняют работу и ухудшают показатели производительности. Использование компактных сверхширокополосных антенн, имеющих лучшие эксплуатационные характеристики, позволит повысить эффективность мероприятий, связанных с работой в широкой полосе частот.

Усовершенствование технических средств, в частности антенной техники, позволит увеличить объемы проведенных работ без снижения их эффективности и выделения дополнительного времени на их проведение.

Theoretical bases of frequency independent antennas designing, examples of their practical realization, electrical parameters of antenna devices are considered. Radiation technique and frequency band classifications of radio engineering devices, the formula and norms for definition a class of antenna facilities are presented. Significance of antenna in a system of radio engineering complex is determined.

1. Бененсон Л. С. Слабонаправленные широкодиапазонные антенны.// Современные проблемы антенно-волноводной техники.— М., 1967.
2. Жук М. С., Молочков Ю. Б. Проектирование линзовых, сканирующих, широкодиапазонных антенн и фидерных устройств. — М. : «Энергия», 1973.
3. Айзенберг Г. З., Белоусов С. П. Коротковолновые антенны. — М. : Радио и связь, 1985.
4. Clarke R. A High Efficiency Bow-tie Antenna//Microwave Journal. — 2001. — № 8. — P. 94—105.
5. Марков Г. Т., Сазонов Д. М. Антенны. Изд. - 2-е. — М. : Энергия, 1975.
6. Зеньковский З., Лепинский Э. Любительские антенны КВ УКВ. — М. : Радио и связь, 1983.
7. *Introduction to Ultra-Wideband Radar Systems*. Edition by J. D. Taylor. — London. — То-куо: CRC Press, Boca Raton, Ann Arbor, 1995.
8. Ротхаммель К. Антенны. — М. : Энергия, 1979.
9. Скорик Е. Самодополнительные антенны.— www.Radioradar.net
10. Куленин В. П. и др. Результаты исследований низкопрофильных диапазонных бортовых УКВ антенн.// Техника средств связи. Серия ТРС. — 1984. — № 6.
11. Омаров Г. С., Хардуш А.Х. Расчет предельной рабочей полосы частот излучателей. — М.: «Радиотехника», 2001.
Сверхширокополосные антенны: Пер. с англ. Под ред. Бененсона Л.С. — М. : Мир, 1964.
13. <http://www.aoruk.com>

Поступила 11.07.07;
после доработки 10.10.07

КОРНЕЙКО Александр Васильевич, канд. техн. наук, зам. директора по учебной и научной работе Ин-та специальной связи и защиты информации Национального технического ун-та Украины «КПИ». В 1982 г. окончил Киевский военный ин-т управления и связи. Область научных исследований — защита информации в информационно-телекоммуникационных системах.

ИВАННИК Тимофей Анатольевич, соискатель при Ин-те специальной связи и защиты информации Национального технического ун-та Украины «КПИ». В 2003 г. окончил военный ин-т телекоммуникации и информатизации Национального технического ун-та Украины «КПИ». Область научных исследований — защита информации в информационно-телекоммуникационных системах, антенная техника.