



**Филиал военной академии ракетных войск  
стратегического назначения имени Петра Великого в  
г. Серпухове**



**Кафедра №52**

**Применения систем и комплексов связи РВСН**

**Учебная дисциплина**

**Системы радиосвязи специального назначения**

**Лекция 9. «Расчет поля излучения антенн»**



**Руководитель занятия доцент кафедры № 52  
кандидат технических наук, доцент Велигоша А.В.**

## Лекция №9. «Расчет поля излучения антенн»

### Формируемые компетенции:

ОПК-5. Способность учитывать в своей профессиональной деятельности современные тенденции развития инфокоммуникационных технологий.

ВПК.ПК-11. Способность осуществлять применение средств связи, средств и комплексов управления средствами связи, антенно-фидерных устройств, организацию и ведение радиообмена.

### Учебные цели

Изучить методы расчета поля излучения антенн в дальней зоне, основанные на принципе суперпозиции, назначение, характеристики устройство и применение штыревых антенн.

### Учебные вопросы:

1. Применение принципа суперпозиции к расчету поля излучения антенн.
2. Особенности расчета поля в дальней зоне антенны.
3. Штыревые антенны военных систем радиосвязи.

### Литература:

1. Сомов А.М., Старостин В.В. Антенно-фидерные устройства. Учебное пособие. - М.: Горячая линия-Телеком. 2011. С. 30-34. Литература [1].
2. Соловьев В.В, Велигоша А.В., Непочатых С.В. Распространение радиоволн и антенно-фидерные устройства. Часть 2. Антенно-фидерные устройства: учебное пособие. - ФВА РВСН им. Петра Великого. 2020. С. 51-60. Литература [2].
3. Соловьев В.В, Велигоша А.В., Непочатых С.В. Распространение радиоволн и антенно-фидерные устройства. Часть 2. Антенно-фидерные устройства: ЭУИ. ФВА РВСН. 2020. С. 51-60. Литература [11].

## Учебный вопрос №1

**«Применение принципа суперпозиции к расчету поля излучения антенн»**

Свойства антенн принято изучать в передающем режиме, поскольку характеристики антенн в приемном режиме просто могут быть определены через их характеристики в передающем режиме с помощью принципа взаимности.

Для проволочных вибраторов примем, что распределение электрических токов, являющихся источниками ЭМП, известно во всех точках антенны. ЭМП, создаваемое антенной, можно найти, вычислив сначала векторный потенциал, а затем продифференцировав по координатам компоненты этого потенциала.

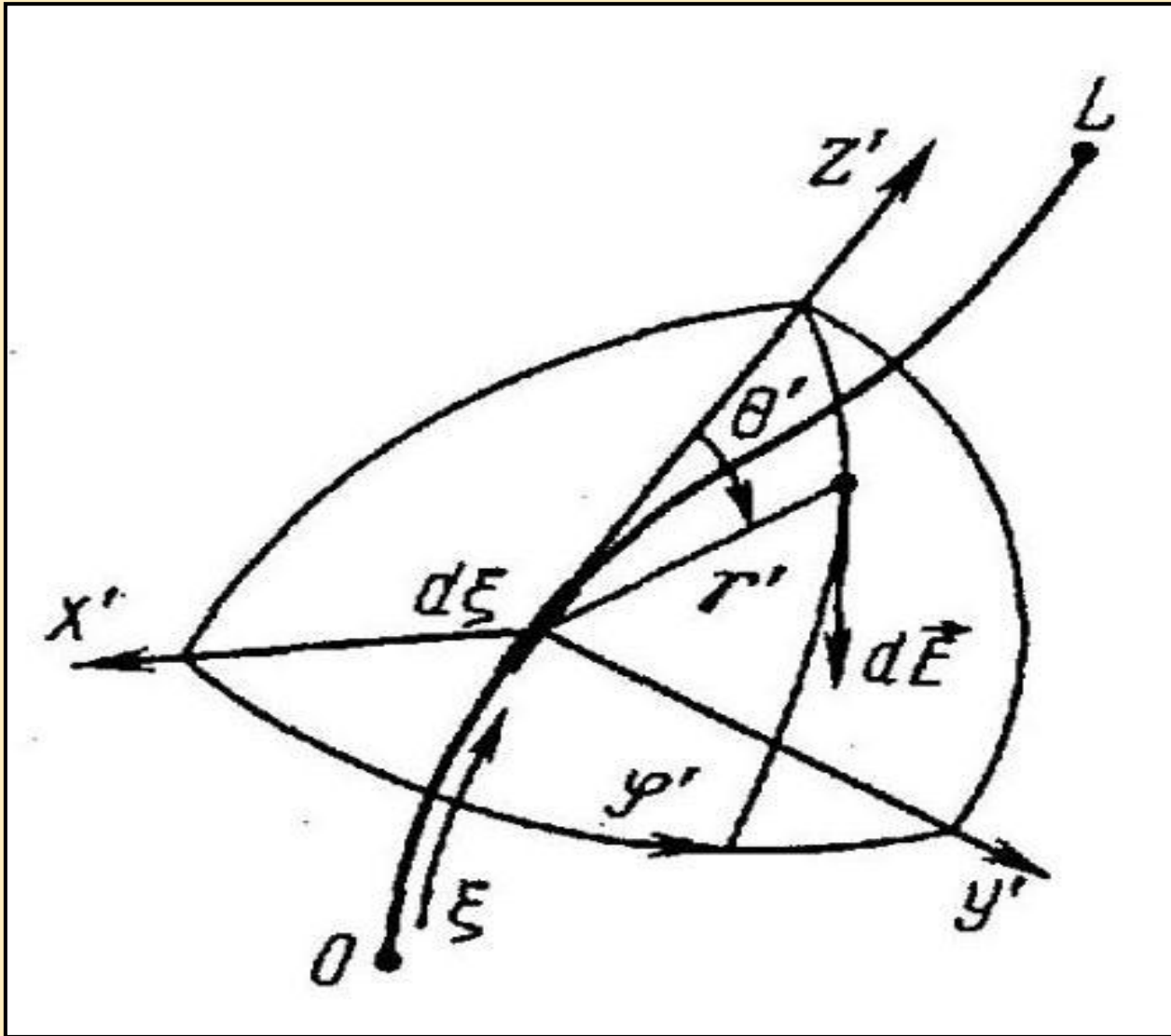
Более просто расчет поля таких антенн может быть осуществлен с использованием принципа **суперпозиции**.

Можно разбить проволочную антенну длиной  $L$  на элементарные участки  $d\xi$ , каждый из которых можно рассматривать как ЭЭВ, и далее найти результирующее поле путем суммирования всех элементарных полей с учетом их поляризаций, амплитуд и фаз. Комплексная амплитуда напряженности электрического поля имеет вид:

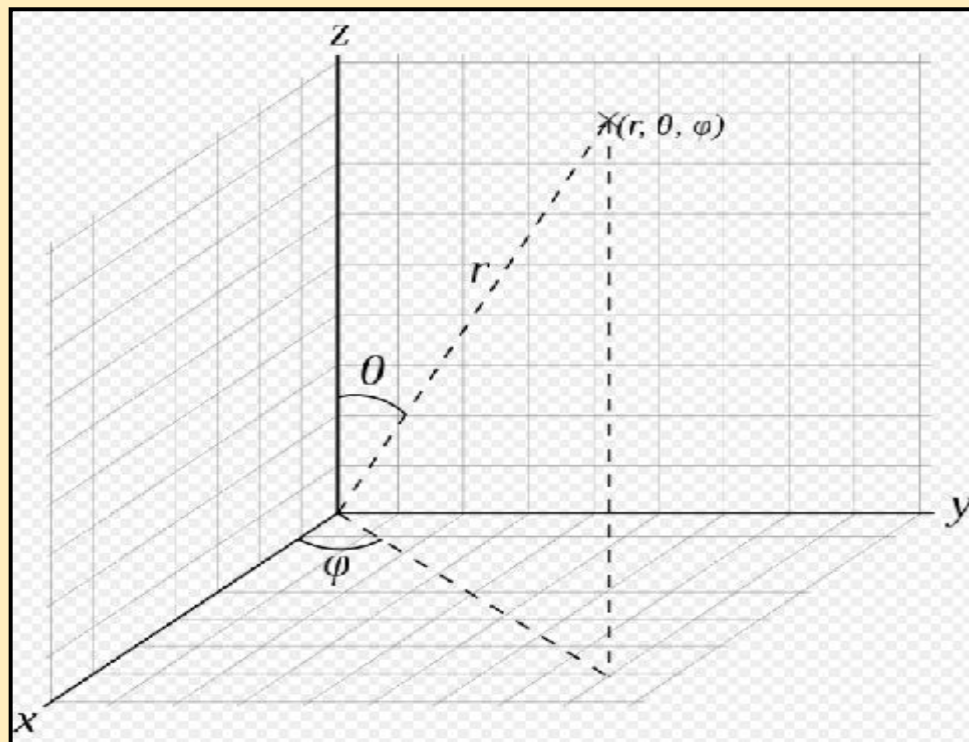
$$d\vec{E} = \vec{\theta}'_0 i \frac{Z_c^0 i(\xi) d\xi}{2r'\lambda} \sin\theta' \exp(-ikr'), \quad (1.1)$$

Выражение (1.1) справедливо в дальней зоне выделенного элемента, т.е. при условии  $r' \gg \lambda$  (достаточно условия  $r' \geq 1,5\lambda$ ). При этом погрешность по амплитуде не превосходит 1%.

Представление комплексной амплитуды напряженности  
электрического поля



**Примечание.** Сферическая система координат - трёхмерная система координат, в которой каждая точка пространства определяется тремя числами  $r$ ,  $\theta$ ,  $\varphi$ , где  $r$  - расстояние до начала координат (радиальное расстояние), а  $\theta$  и  $\varphi$  - зенитный и азимутальный углы соответственно.





Результирующее поле определяется путем геометрического суммирования полей всех элементарных участков:

$$\vec{E} = \int_L d\vec{E}, \quad \vec{H} = \int_L \vec{H}. \quad (1.3)$$

Когда распределение тока по антенне неизвестно или слишком сложно, но известно распределение поля вблизи антенны (ситуация для антенн параболических антенн), найти излучаемое антенной поле можно с помощью принципа эквивалентности.

Согласно этому принципу излучение реальных электрических токов заменяется излучением эквивалентных поверхностных электрических и магнитных токов, распределенных в точках воображаемой произвольной поверхности  $S$ , окружающей антенну.

Разбивая поверхность  $S$  на элементарные площадки  $dS$  и рассматривая каждую площадку как совокупность двух элементарных излучателей – электрического и магнитного, можно найти полное поле во внешней области, суммируя поля, созданные отдельными элементами. Учитывают токи только на части замкнутой поверхности  $S$ , где они наиболее существенны, причем эту часть поверхности выбирают совпадающей с фронтом волны, излучаемой антенной.

В данном случае каждую элементарную площадку можно рассматривать как элемент волнового фронта – элемент Гюйгенса, электрическое поле которого в локальной сферической системе координат при  $r' \ll \lambda$  можно записать:

$$d\vec{\dot{E}} = \theta'_0 d\dot{E}_{\theta'} + \vec{\varphi}'_0 d\dot{E}_{\varphi'}, \quad (1.5)$$

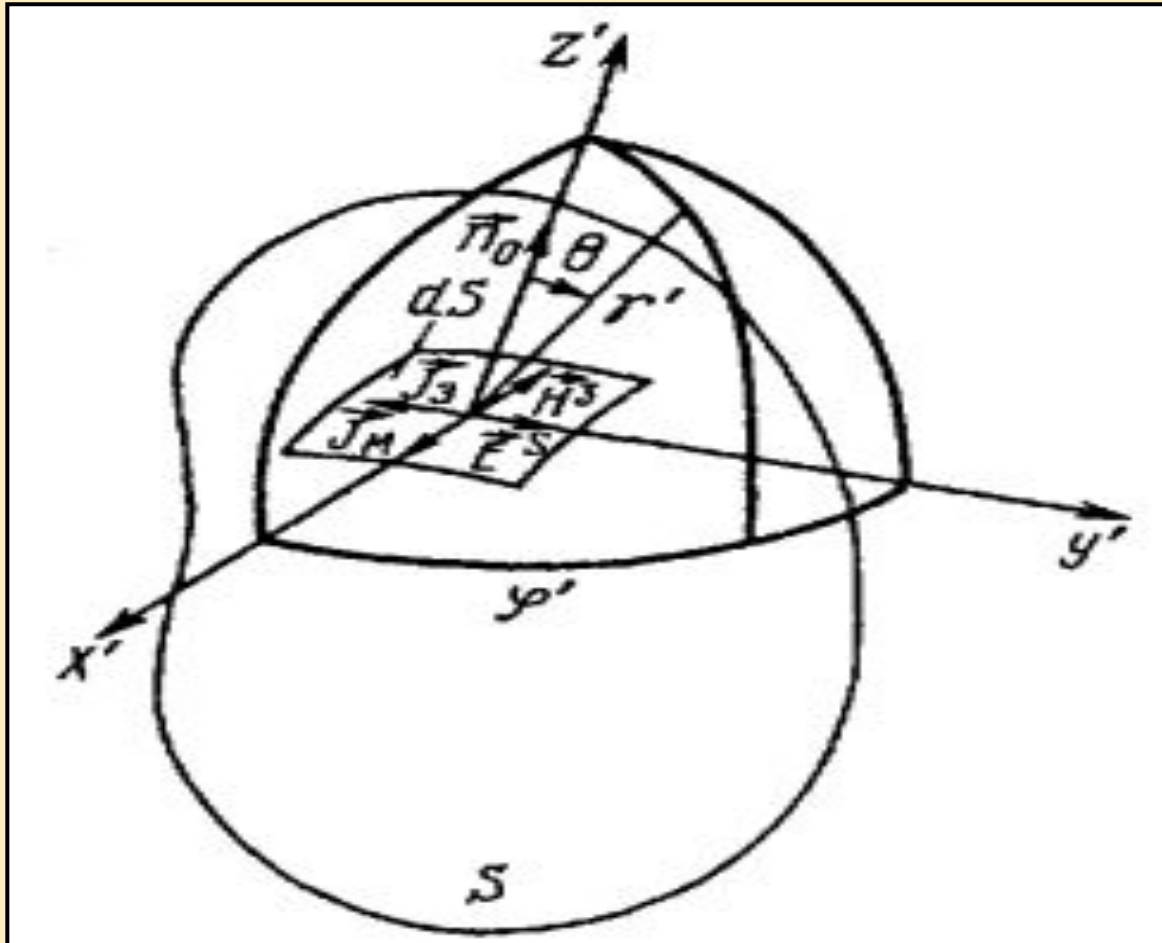
где

$$d\dot{E}_{\theta'} = i \frac{\sin\varphi'}{2r'\lambda} \left( \frac{Z_c^0}{Z_c} \cos\theta' + 1 \right) \dot{E}_s \exp(-ikr') dS,$$

$$d\dot{E}_{\varphi'} = i \frac{\cos\varphi'}{2r'\lambda} \left( \frac{Z_c^0}{Z_c} + \cos\theta' \right) \dot{E}_s \exp(-ikr') dS.$$

В выражениях для  $d\dot{E}_{\theta'}$  и  $d\dot{E}_{\varphi'}$   $Z_c^0$  — характеристическое сопротивление среды;  $Z_c$  характеризует отношение амплитуд полей  $\vec{\dot{E}}^s$  и  $\vec{\dot{H}}^s$ .

$$\vec{E} = \int_S d\vec{E}. \quad (1.6)$$



Описанный принцип суперпозиции применим и для нахождения поля системы произвольных идентичных излучателей, расположенных в пространстве по определенному закону, если известно поле излучения одного элемента, входящего в систему.

В сферической системе координат, идентично связанной с каждым из излучающих элементов с индексом  $n$ , электрическое поле в дальней зоне элемента имеет компоненты  $\dot{E}_Q$  и  $\dot{E}_\varphi$ , т.е.

$$\vec{\dot{E}}_n = \vec{\theta}_{0n} \dot{E}_{\theta_n} + \vec{\varphi}_{0n} \dot{E}_{\varphi_n}, \quad (1.7)$$

по аналогии с (1.1) и (1.2) каждая компонента независимо от физической природы излучателей может быть представлена в виде:

$$\dot{E}_{\theta_n} = \frac{a_{\theta} \dot{I}_n \tilde{f}_0^{(\theta)}(\theta_n, \varphi_n) \exp(-ikr_n)}{r_n}; \quad (1.8)$$

$$\dot{E}_{\varphi_n} = \frac{a_{\varphi} \dot{I}_n \tilde{f}_0^{(\varphi)}(\theta_n, \varphi_n) \exp(-ikr_n)}{r_n}, \quad (1.9)$$

где  $a_{\theta}$ ,  $a_{\varphi}$  – амплитудные множители, определяемые типом излучателя;  $\dot{I}_n$  – ток в  $n$ -м излучателе;  $\tilde{f}_0^{(\theta)}(\theta_n, \varphi_n)$  и  $\tilde{f}_0^{(\varphi)}(\theta_n, \varphi_n)$  – ДН излучающего элемента по соответствующей компоненте поля.

Если закон распределения тока по излучающим элементам известен и эффект взаимной связи не искажает структуру поля каждого из излучателей, то результирующее поле определяется:

$$\dot{\vec{E}} = \sum_{n=1}^N \dot{\vec{E}}_n, \quad (1.10)$$

где  $N$  – число излучателей в системе.

Показано, что применение принципа суперпозиции позволяет проводить расчет поля произвольной антенны путем нахождения поля элементарного излучателя и затем сложения их полей. Рассмотренный подход может быть применен для расчета полей проволочных антенн, реализованных в виде системы излучателей и апертурных антенн. В последнем случае антенна представляется как совокупность элементарных поверхностей, а подход к расчету поля называется принцип эквивалентности. Если закон распределения тока по излучающим элементам известен и эффект взаимной связи не искажает структуру поля каждого из излучателей, то результирующее поле определяется как сумма полей  $N$  излучателей в системе, что характерно для антенных решеток.

**Учебный вопрос №2**  
**«Особенности расчета поля в дальней  
зоне антенны»**



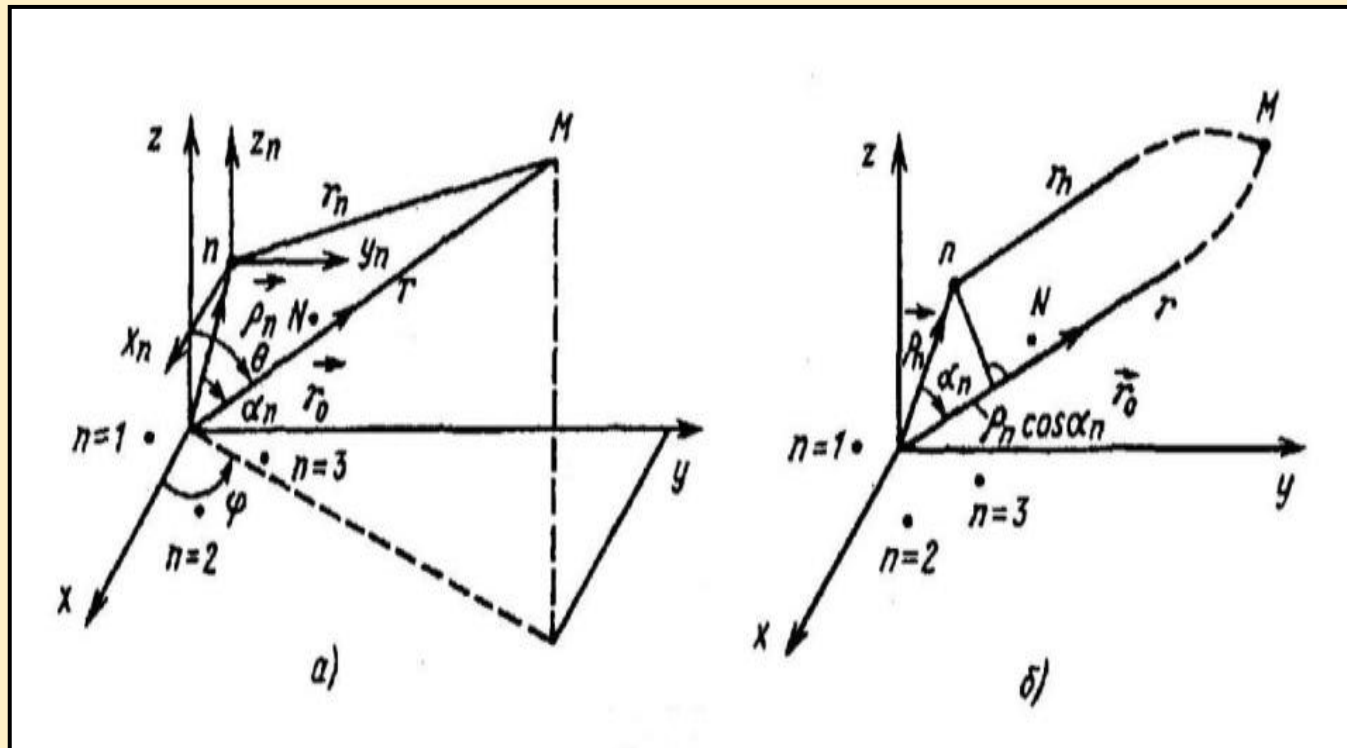


Введем также общую сферическую систему координат  $r, \theta, \varphi$ . В системе координат  $r_n, \theta_n, \varphi_n$  каждая компонента поля излучения рассматриваемого элемента имеет вид:

$$\dot{E}_n = a I_n \tilde{f}_0(\theta_n, \varphi_n) \exp(-ikr_n) / r_n \quad (2.1)$$

Необходимо все функции, входящие в (2.1) и зависящие от координат  $r_n, \theta_n, \varphi_n$ , выразить через  $r, \theta, \varphi$ . С осторожностью следует подойти к замене  $r_n$  на  $r$  в фазовом множителе  $\exp(-ikr_n)$ , поскольку даже небольшое отличие  $r_n$  от  $r$  может привести к большим фазовым ошибкам.

Так, если  $\rho_n$  составляет всего **15 мм**, то на частоте  **$f = 10$  ГГц ( $\lambda = 3$  см)** максимальная фазовая ошибка при замене  $r_n$  на  $r$  независимо от абсолютного значения  $r$  может составить значение  **$\Delta\Phi = k\rho_n = 180^\circ$** .



В дальней зоне излучающей системы можно положить:

$$r_n = r - \rho_n \cos \alpha_n. \quad (2.3)$$

Указанное равенство равносильно тому, что лучи, проведенные в точку наблюдения  $M$  из начала общей системы координат и из точки расположения излучаемого элемента, считаются параллельными.

Из параллельности лучей следует равенство угловых координат:  $\theta_n = \theta$ ,  $\varphi_n = \varphi$ . Следовательно, векторы  $\vec{E}$ , создаваемые отдельными излучателями, в точке наблюдения параллельны между собой, компоненты результирующего вектора можно находить как сумму компонент каждого из элементарных полей.

Что касается величины  $1/r_n$ , влияющей на амплитуду поля (2.1), то ее можно заменить на  $1/r$ .

Принятые выше допущения тем строже, чем больше расстояние  $r$ . Определим более точно, при каком расстоянии можно ими пользоваться. Основная погрешность при использовании соотношения (2.3) определяется ошибкой при вычислении фазового множителя, равной:

$$k \frac{\rho_n^2}{2r} \sin^2 \alpha_n.$$

Если потребовать, чтобы фазовая ошибка не превышала  $\pi/8$ , т.е.  $22,5^\circ$ , то необходимо, чтобы

$$r \geq 2 D^2 / \lambda. \quad (2.5)$$

где  $D$  – максимальный линейный размер излучающей системы.

Из (2.5) следует, что с увеличением размеров излучающей системы граница дальней зоны резко отодвигается от антенны. Так, если  $D=10\lambda$ , то дальняя зона начинается с  $r = 200\lambda$ . При частоте  $f = 10$  ГГц это расстояние составит **6 м**. При  $D=100\lambda$  граница дальней зоны начинается с расстояния  $r=20000\lambda$ , что соответствует **600** метрам.

Условие (2.5) дает верхнюю границу дальней зоны во всем секторе углового положения точек наблюдения относительно антенны, поскольку оно справедливо для углов  $\alpha_n$ , близких к  $\pi/2$ .

Вернемся к процедуре нахождения результирующего поля, излучаемого системой из дискретных излучателей с известным законом распределения тока в элементах. В дальней зоне выражение для поля  $n$ -го излучателя в единой системе координат  $r, \theta, \varphi$  примет вид:

$$\dot{E}_n = \frac{a}{r} \dot{I}_n \tilde{f}_0(\theta, \varphi) \exp(-ikr) \exp(ik\rho_n \cos\alpha_n). \quad (2.6)$$

При этом каждую компоненту результирующего поля можно вычислить как:

$$\dot{E} = \frac{a}{r} \dot{I}_n \tilde{f}_0(\theta, \varphi) \exp(-ikr) \sum_{n=1}^N \dot{I}_n \exp[ik(x_n \sin\theta \cos\varphi + y_n \sin\theta \sin\varphi + z_n \cos\theta)]$$

Описанные выше излучающие системы из идентичных элементов носят название антенных решеток.

Из последнего выражения видно, что для АР ДН определяется для каждой из компонент выражением:

$$\vec{f}(\theta, \varphi) = \tilde{f}_0(\theta, \varphi) \cdot \tilde{f}_c(\theta, \varphi), \quad (2.7)$$

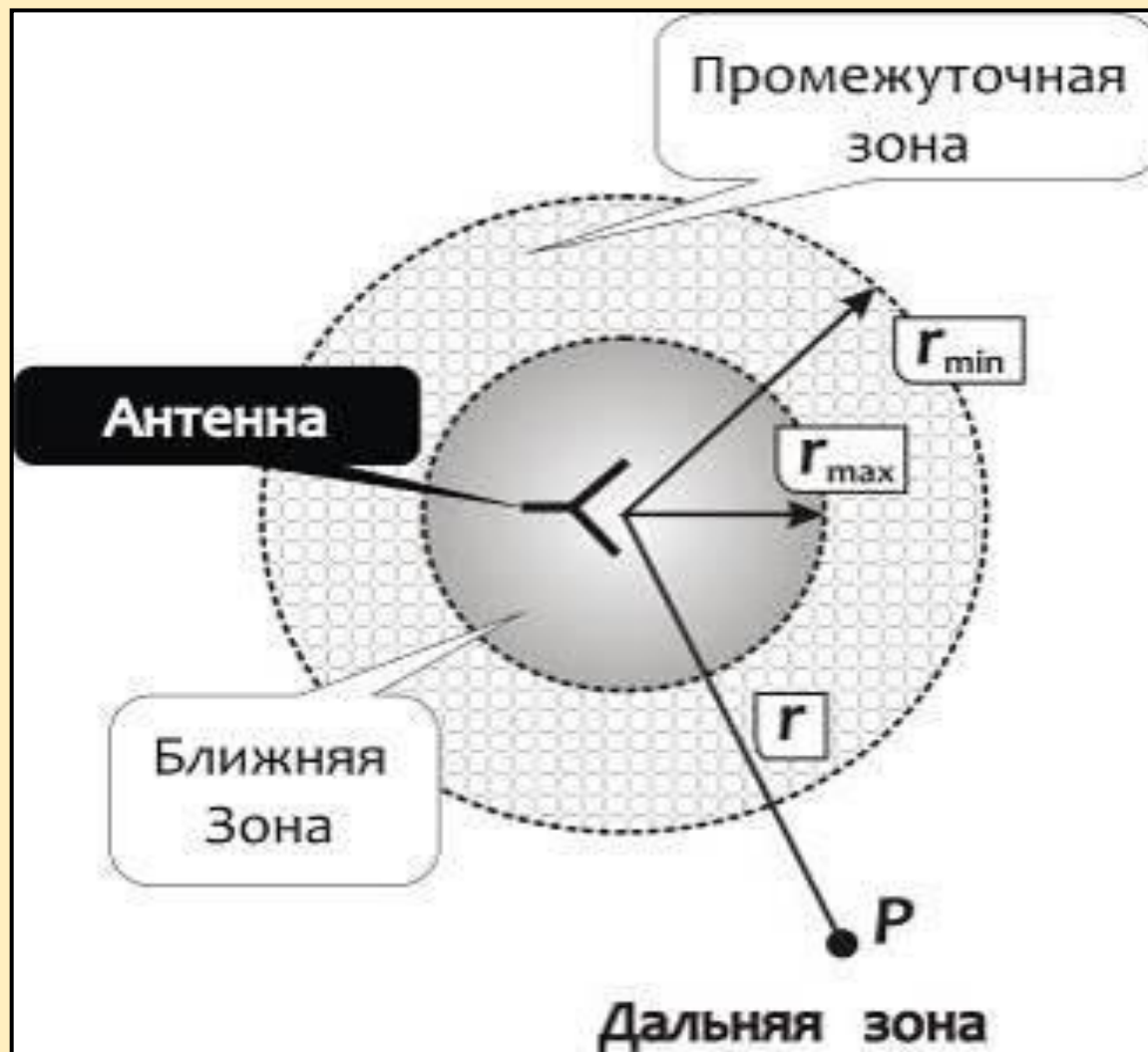
где  $\tilde{f}_0(\theta, \varphi)$  – комплексная ДН излучающего элемента, а  $\tilde{f}_c(\theta, \varphi)$  - множитель системы (множитель решетки).



Множитель системы для любой антенной решетки определяется: амплитудой токов в элементах, фазами токов в элементах и фазовым сдвигом между полями, обусловленными разностью хода лучей от каждого элемента по сравнению с лучом, проведенным в точку наблюдения из начала общей системы координат.

Расчет поля в области промежуточной и ближней зон существенно сложнее, чем в дальней зоне, ввиду невозможности использования принятых выше допущений.

# Представление размещения зон распределения излучения от изотропной антенны



Основное отличие структуры поля в промежуточной зоне от поля в дальней зоне проявляется в том, что на монотонное убывание поля по закону  $1/r$  накладывается осциллирующее амплитудное затухание, а угловая зависимость поля оказывается зависящей от  $r$ , т.е. ДН в промежуточной зоне искажается. В ближней зоне поля имеют как поперечные, так и продольные составляющие векторов  $\vec{E}$  и  $\vec{H}$ , зависимость от расстояния  $r$  носит здесь нерегулярный характер.

Необходимость знания поля в промежуточной и ближней зонах связана с расчетом входного сопротивления антенн, эффектов взаимной связи между близко расположенными антеннами (проблема ЭМС), влияния поля антенны на обслуживающий персонал. Кроме того, знание структуры поля в ближней или промежуточной зоне позволяет путем соответствующего пересчета определять ДН антенны в дальней зоне.

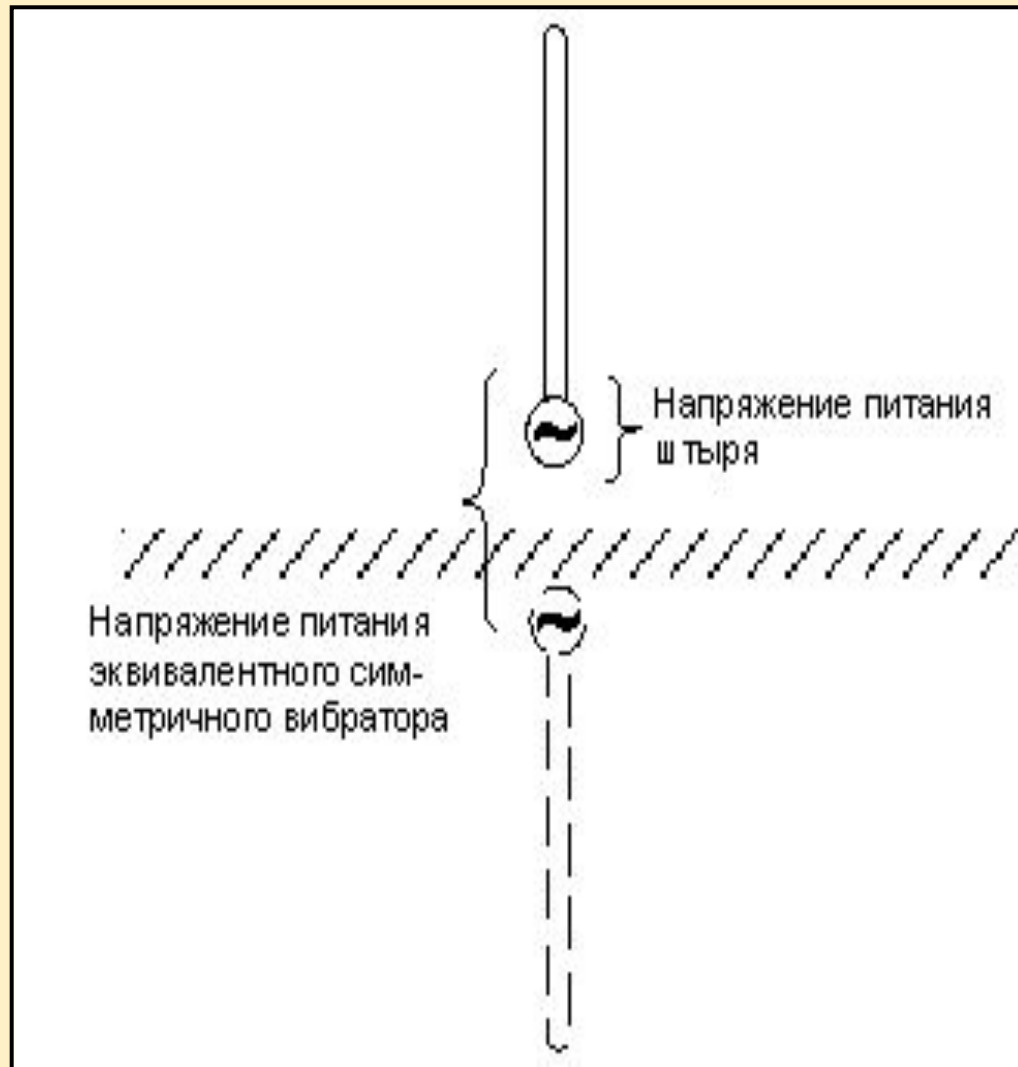
Рассмотрены особенности расчета поля в дальней зоне антенны. Показано, что векторы напряженности электрического поля, создаваемые отдельными излучателями, в точке наблюдения параллельны между собой и компоненты результирующего вектора можно, определять как сумму компонент каждого из элементарных полей. Показана зависимость расстояния точки наблюдения в дальней зоне от значений ее координат. Показаны возможные ошибки при определении напряженности поля и условия определения границы дальней зоны в зависимости от требуемой точности оценки.

**Учебный вопрос №**  
**«Штыревые антенны военных систем  
радиосвязи»**

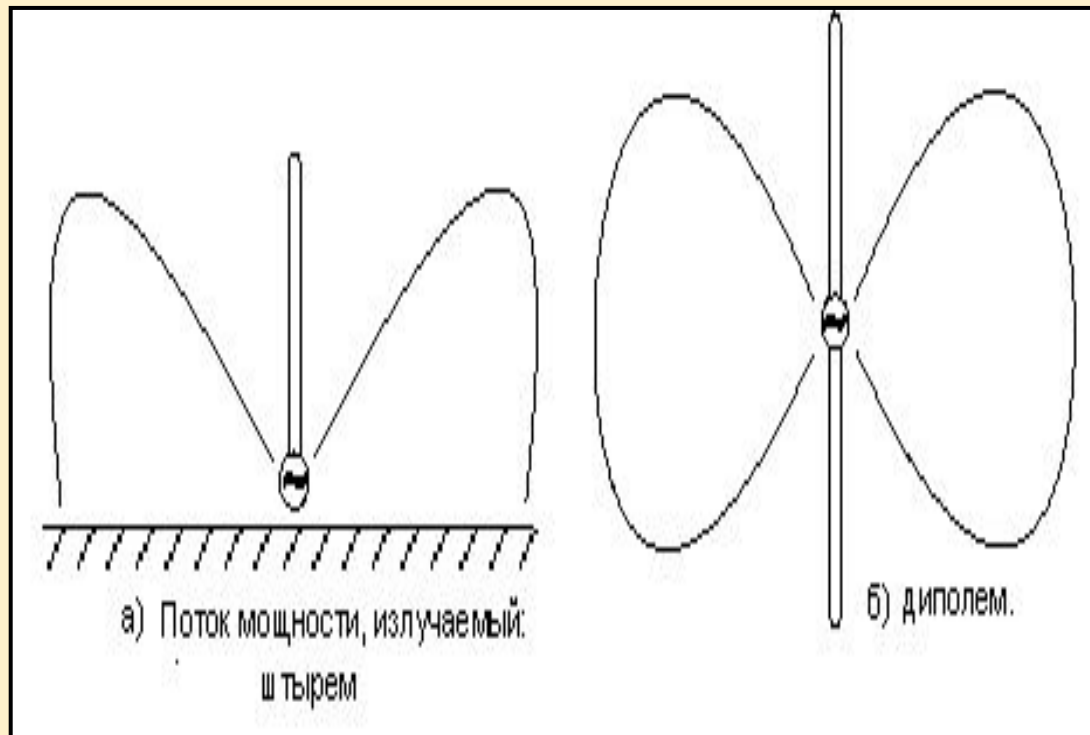
Несимметричными (штыревыми) называются антенны, расположенные непосредственно вблизи Земли перпендикулярно (наклонно) к её поверхности.

Если считать Землю идеально проводящей и учитывать зеркальное отображение, то несимметричный вибратор (НВ) можно считать половиной эквивалентного ему СВ.

Сопротивление излучения НВ в два раза меньше, чем у эквивалентного СВ, поскольку при одинаковых токах первый излучает в два раза меньшую мощность (нет излучения в нижнее полупространство).

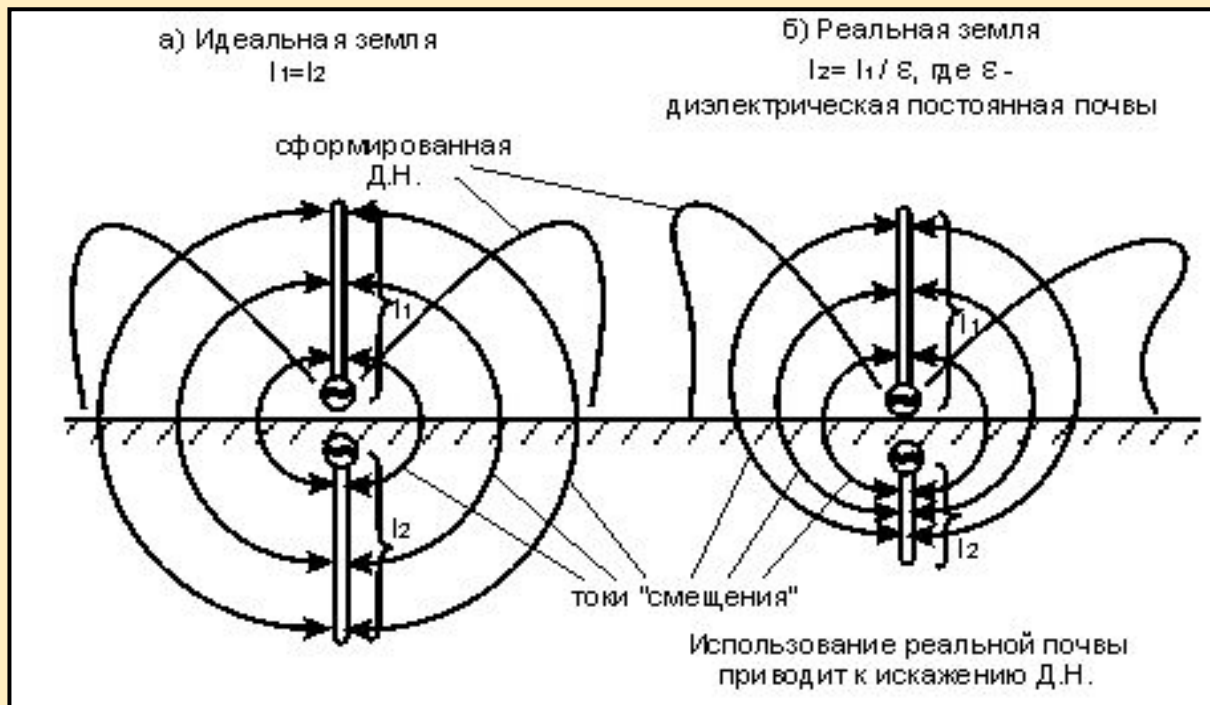


Входное сопротивление НВ в два раза меньше, чем у эквивалентного СВ, поскольку при одинаковых токах питания у первого напряжение питания в два раза меньше.





Коэффициент направленного действия (коэффициент усиления) НВ в два раза больше, чем у эквивалентного СВ, так как при одинаковой мощности излучения первый обеспечивает в два раза большую плотность мощности, так как вся его мощность излучается в одно полупространство.



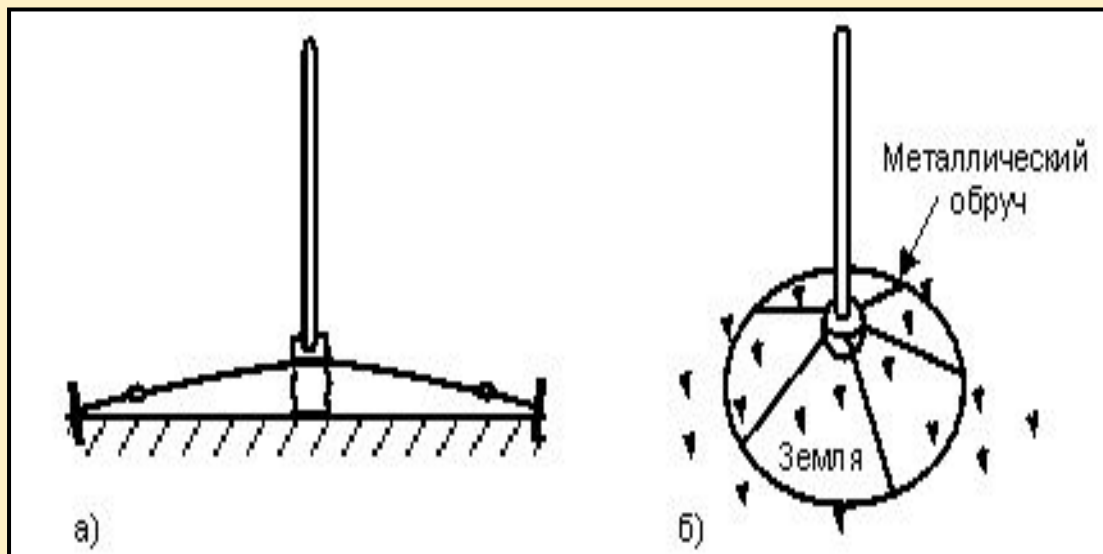
Всё вышесказанное было справедливо для идеального НВ, то есть когда Земля представляет собой идеальный проводник.

Низкая проводимость почвы приводит к уменьшению амплитуды тока в вибраторе  $a$ , следовательно, к повышению его сопротивления и уменьшению излучаемой мощности. Кроме того, почва, обладающая плохой проводимостью, является обычно диэлектриком с большой диэлектрической проницаемостью, в результате чего происходит искажение ДН (поднятие лепестков вверх и уменьшение излучения под малыми углами к горизонту) и, конечно, увеличение комплексного сопротивления штыря.

По этой причине практически не используют почву в качестве «Земли», а используют так называемую «искусственную Землю».

**«Земля» штыревой антенны.** В работе штыревой антенны важную роль играет заземляющая система. Расчеты показывают, что наибольшие потери имеют место в зоне с радиусом  $0,35\lambda$ , поэтому в этой зоне желательно провести «металлизацию» Земли.

Это позволит увеличить эффективность работы антенны и расширит ее широкополосность.



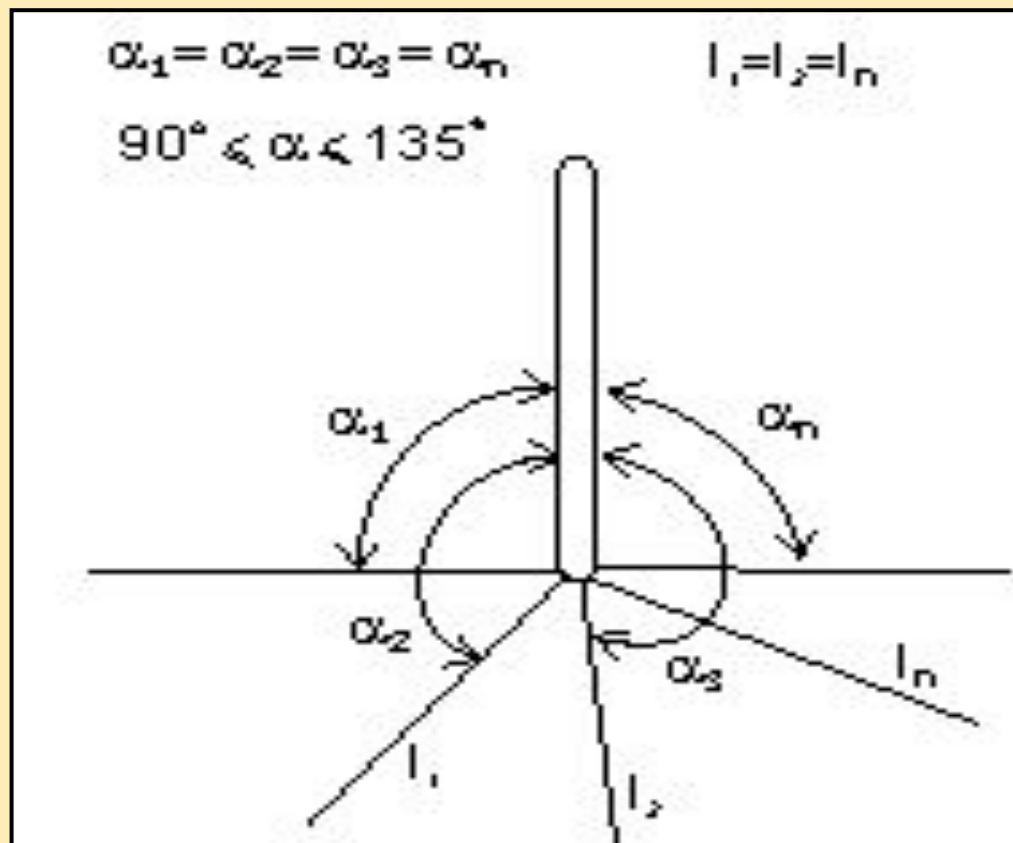
Противовесы ША следует располагать на некотором удалении от Земли.

Можно не изолировать концы противовесов от Земли – если они надёжно соединены кольцом-перемычкой .

Противовесы должны быть расположены на одинаковом расстоянии относительно друг друга. Угол расположения противовесов относительно штыря должен быть от  $90^\circ$  до  $135^\circ$ . При больших и меньших углах КПД падает, и ДН искажается. Противовесы должны быть длиной не менее длины основного штыря.

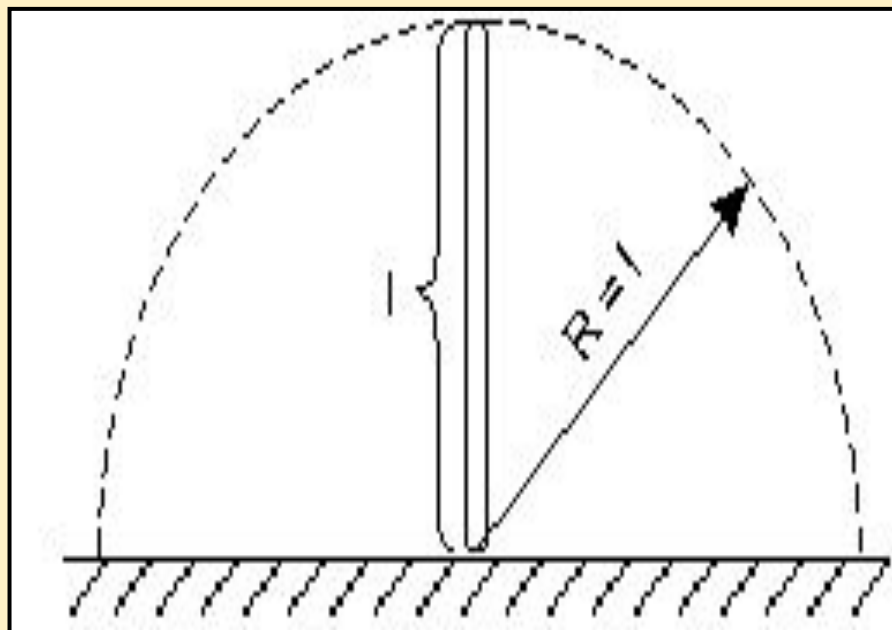
Протекающие между штырём и противовесами токи смещения занимают определённый объём, который участвует в формировании ДН.

Уменьшение длины противовесов уменьшает объёма пространства, служащего для формирования ДН и ухудшаются характеристики антенн.





Токи смещения, как и все обычные токи, протекают по пути наименьшего сопротивления, который сосредоточен в объёме, ограниченном радиусом штыря. За пределами этого объёма токи смещения будут малы и не будут играть заметной роли в создании ДН, хотя и приведут к некоторому увеличению излучения под малыми углами к горизонту.

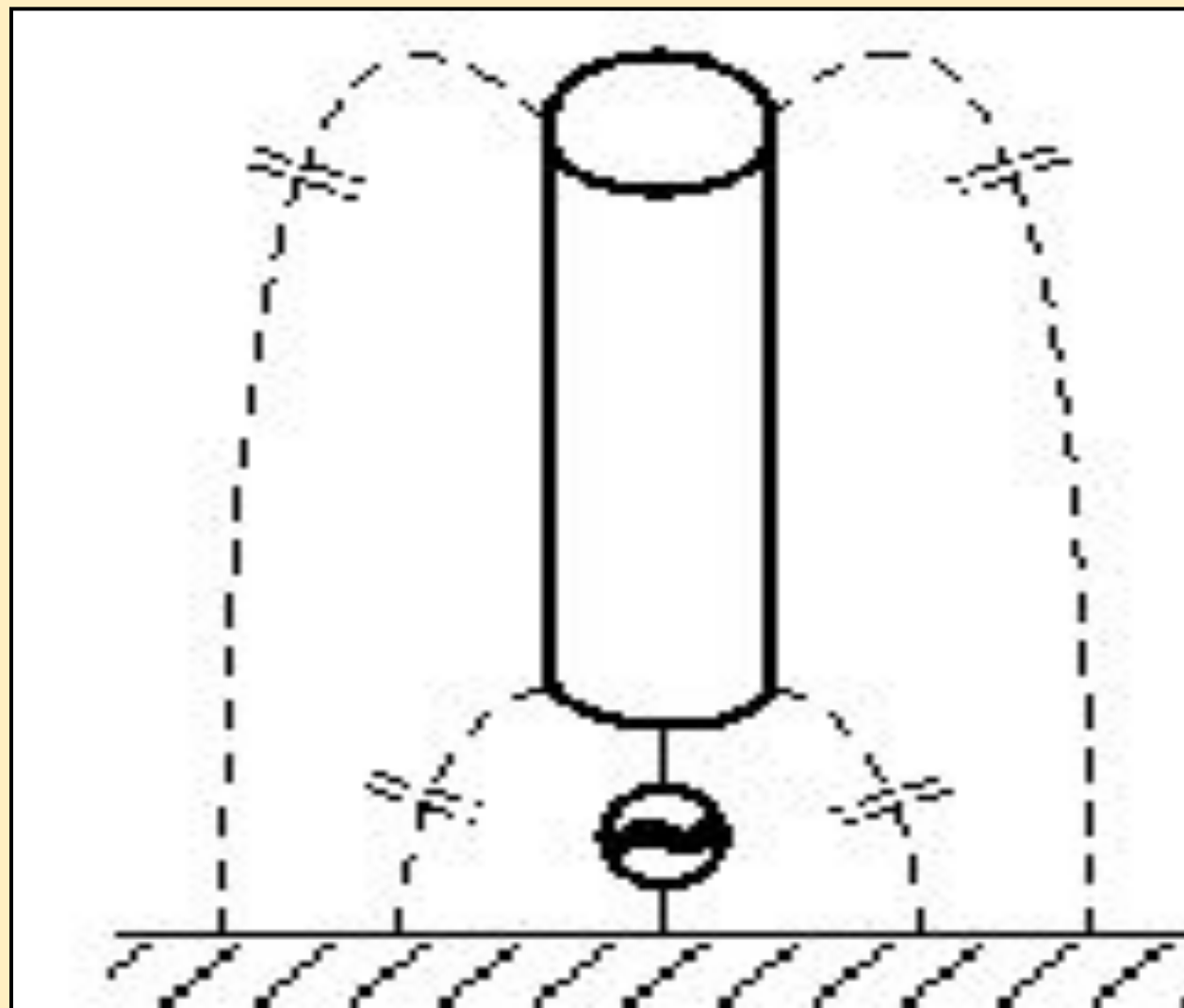


## Размеры вибраторов штыревой антенны.

Сопротивление излучения антенны  $R_{\text{изл}}$  пропорционально отношению  $l/d$ , где  $l$  - длина и  $d$  - диаметр антенны. В то же время, добротность антенны  $Q = R_{\text{изл}} / R_a$ , где  $R_a$  - сопротивление антенны. Отсюда следует, чем меньше отношение  $l/d$ , тем широкополоснее антенна. КПД ее также растет за счет уменьшения активной составляющей вибратора и улучшения взаимодействия токов смещения с противовесами.

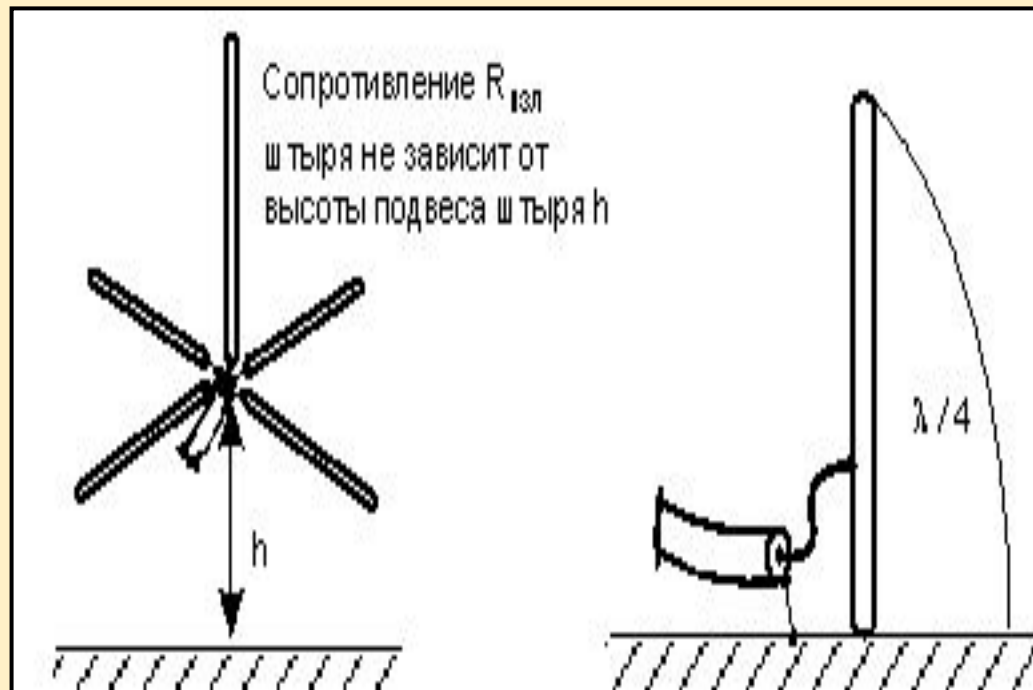
Следует учесть, что при использовании толстых вибраторов сказывается «торцевой эффект». Он обусловлен емкостью между торцами вибратора и Землей.

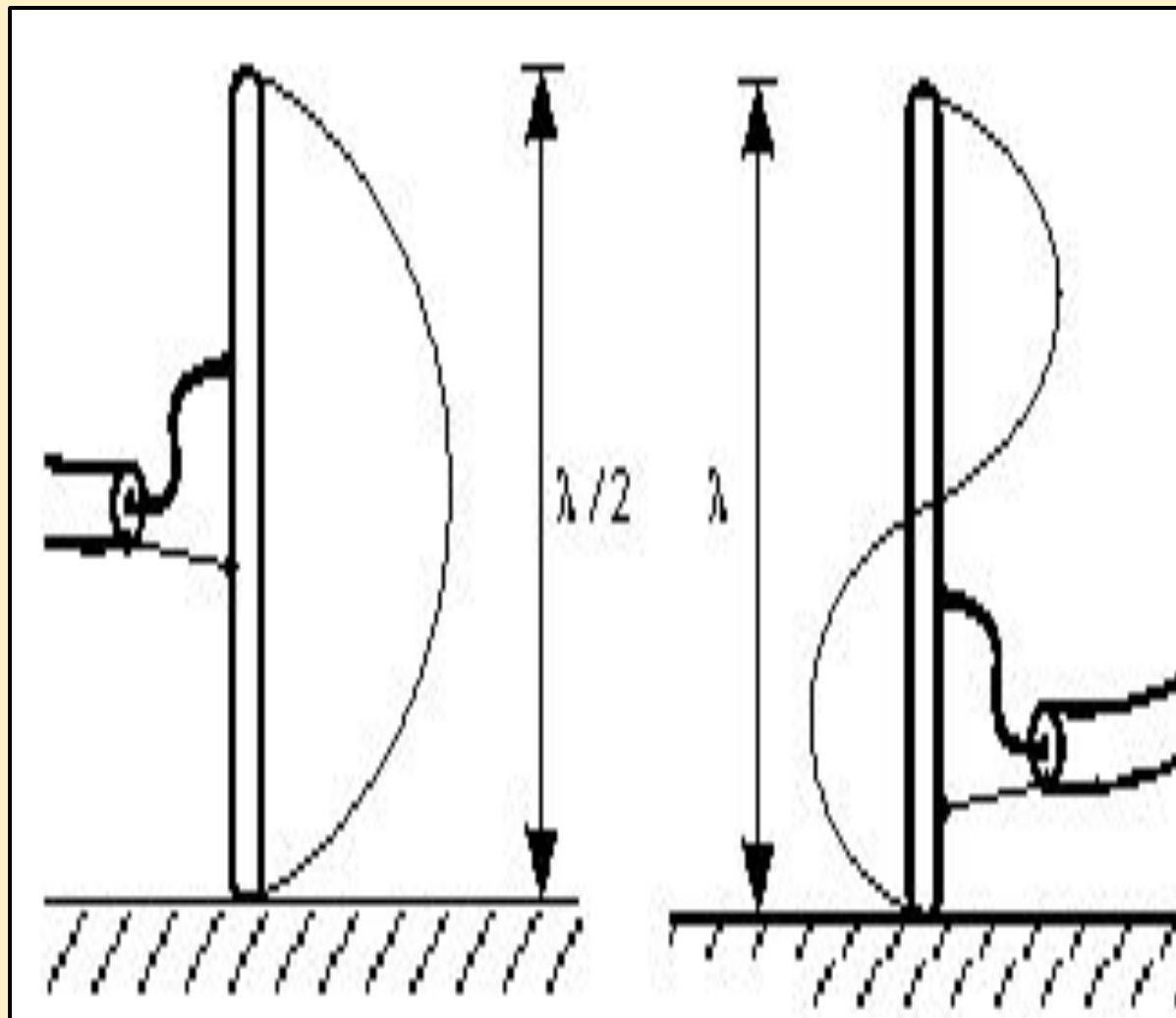


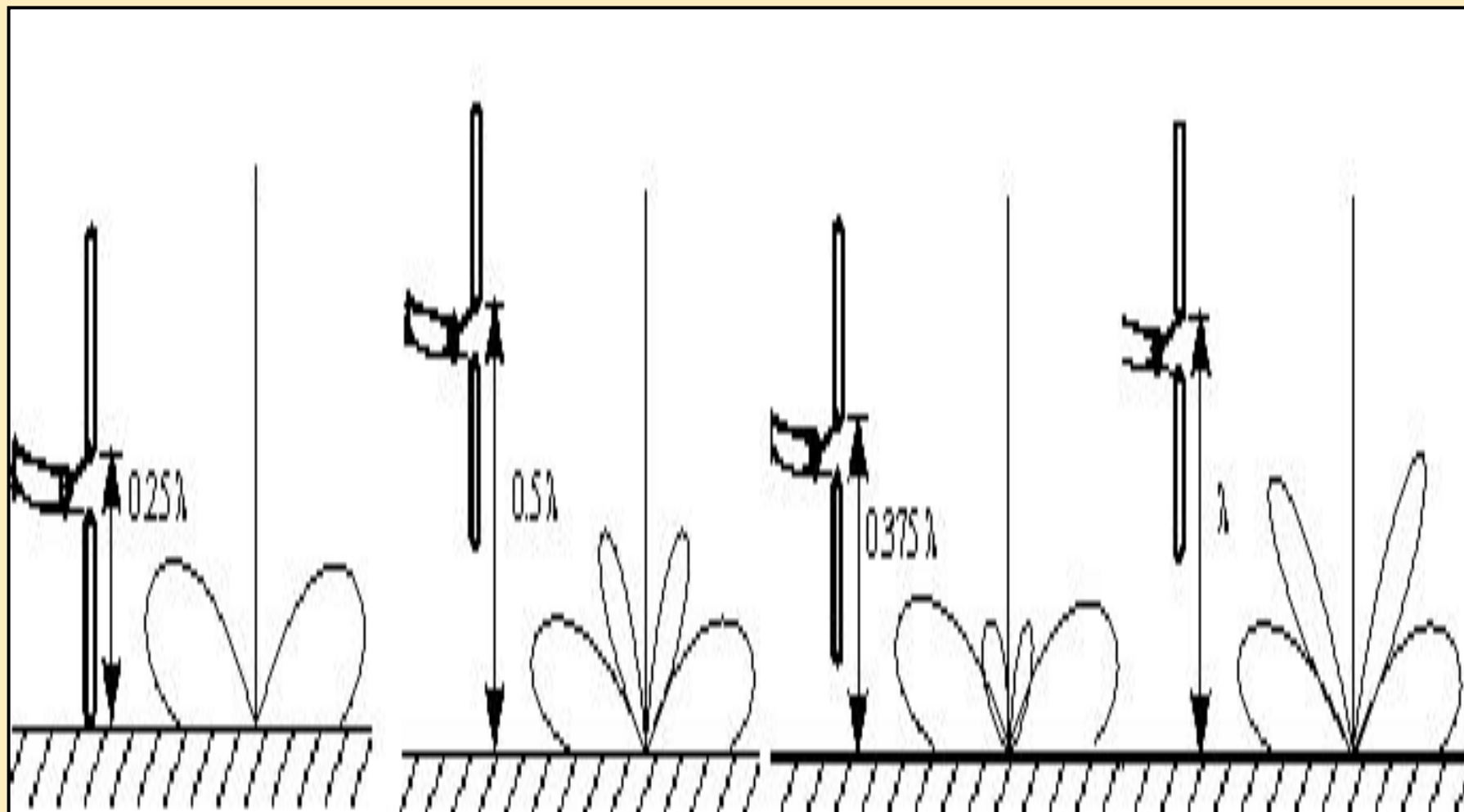


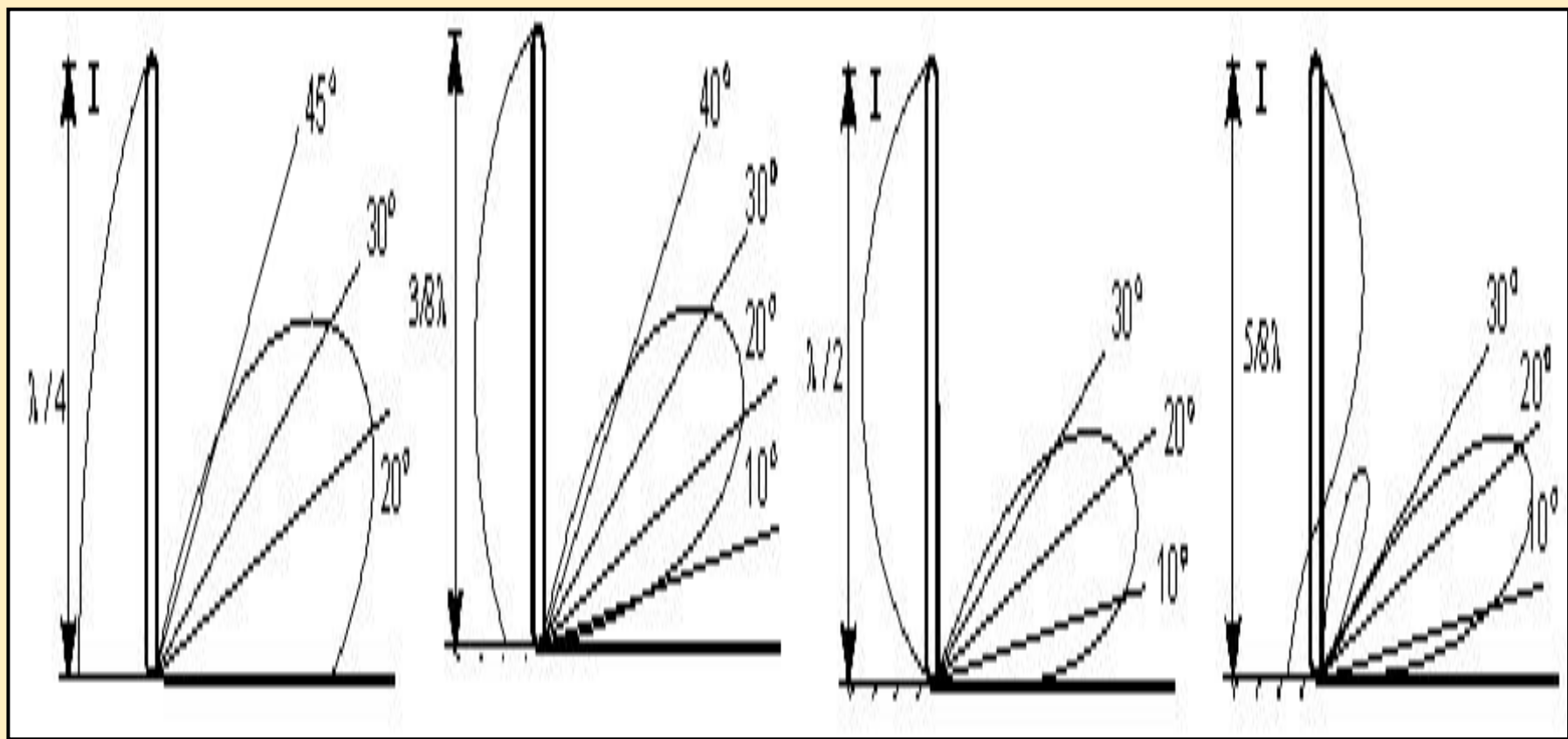
**ДН штыревых антенн, расположенных на земле и над землей.** Распределение токов не зависит от высоты подвеса при наличии системы противовесов.

Практически это означает, что на какой бы высоте штырь вместе со своей системой «земли» ни находился, его сопротивление будет постоянным.









Для успешной работы штыревая антенна должна быть согласована с линией питания и настроена в резонанс с излучаемым ей сигналом. Согласующих устройств штырей можно разбить на три группы.

штырь согласованный, электрическая длина которого равна  $\lambda/4$ ;

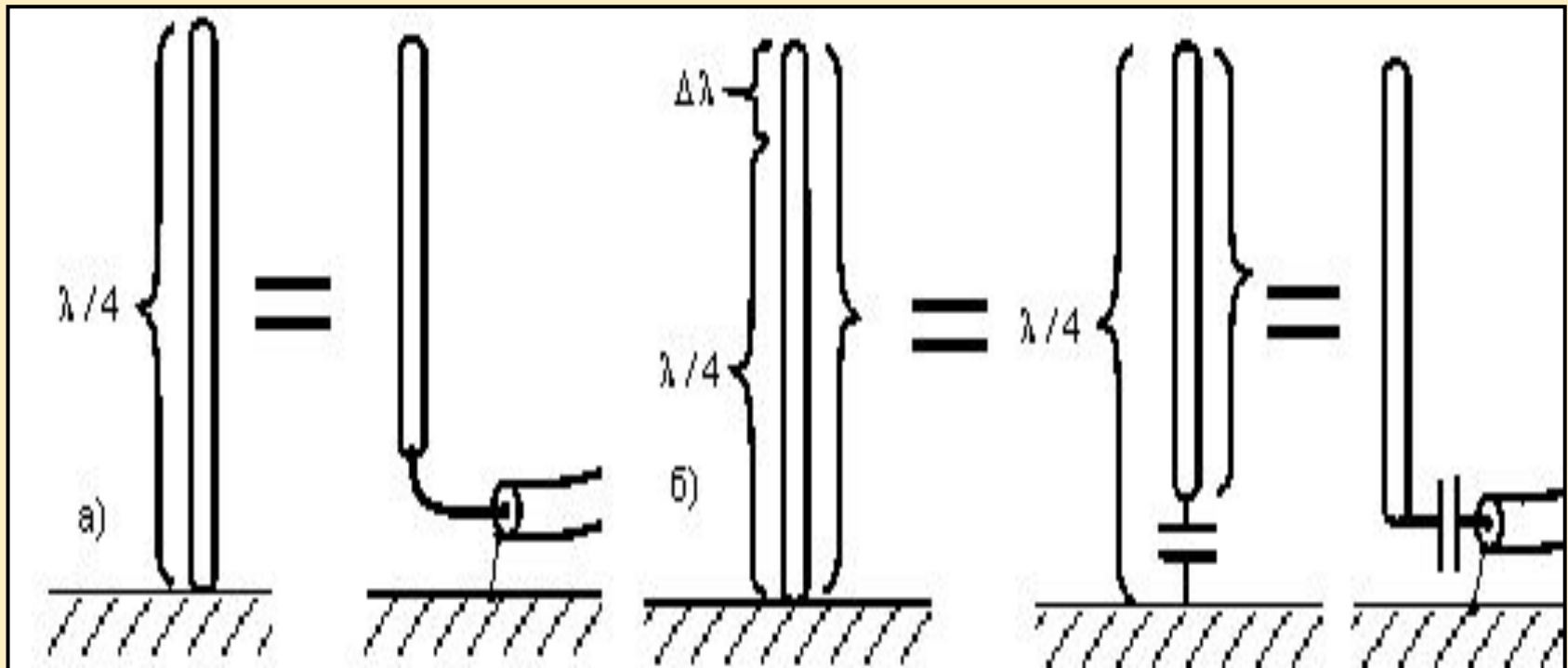
штырь с электрической длиной больше  $\lambda/4$  (эту «лишнюю» длину убирают с помощью емкости);

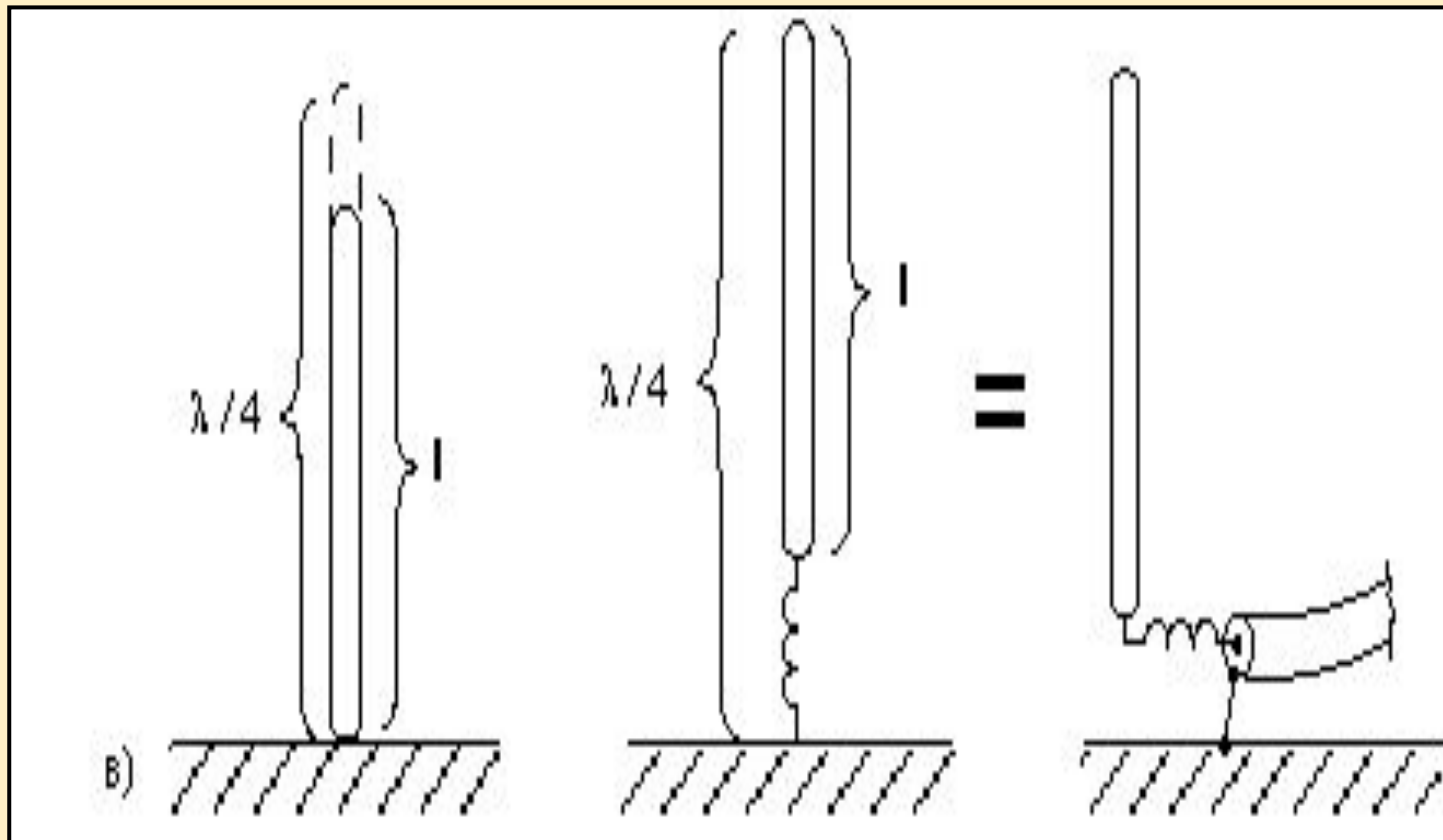
штырь с электрической длиной меньше  $\lambda/4$  («недостающую» длину добавляют катушкой индуктивности).

Такое согласование применимо и к штырям длиной, кратной  $\lambda/4$ .

**Типы штыревых антенн. Несимметричный вибратор над экраном конечных размеров или классический штырь.**

В качестве экрана обычно используют противовесы длиной не менее  $\lambda/4$ . Ее ДН совпадает с ДН идеального штыря над бесконечно проводящей Землей.

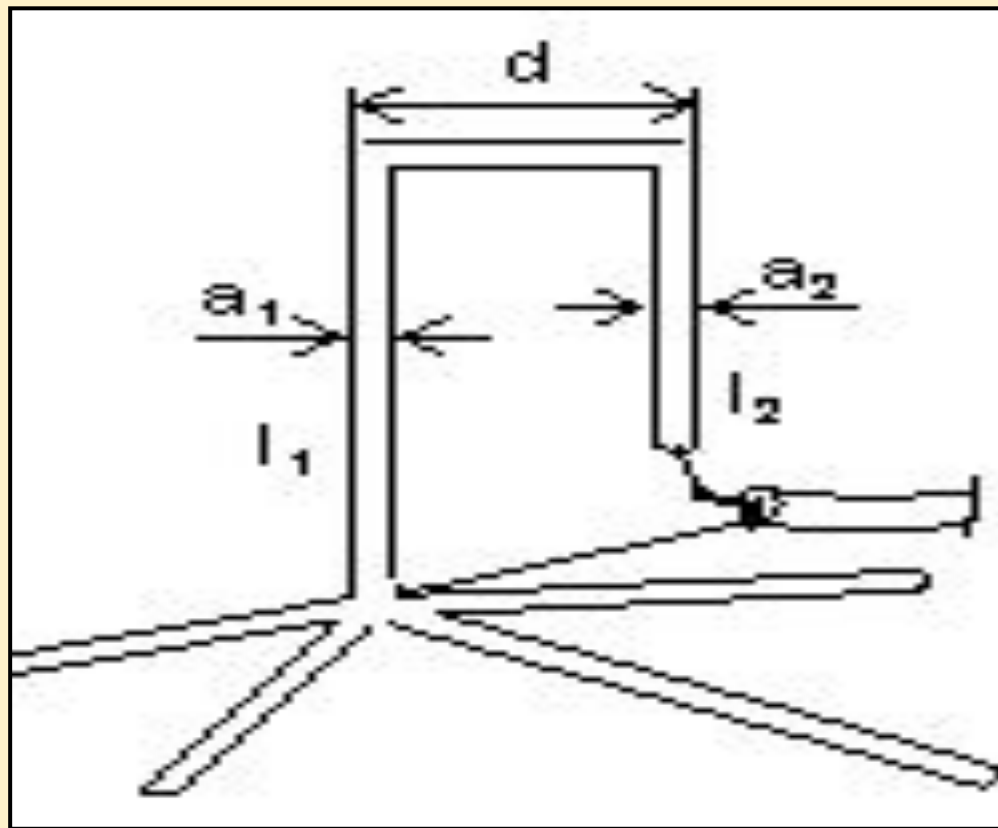






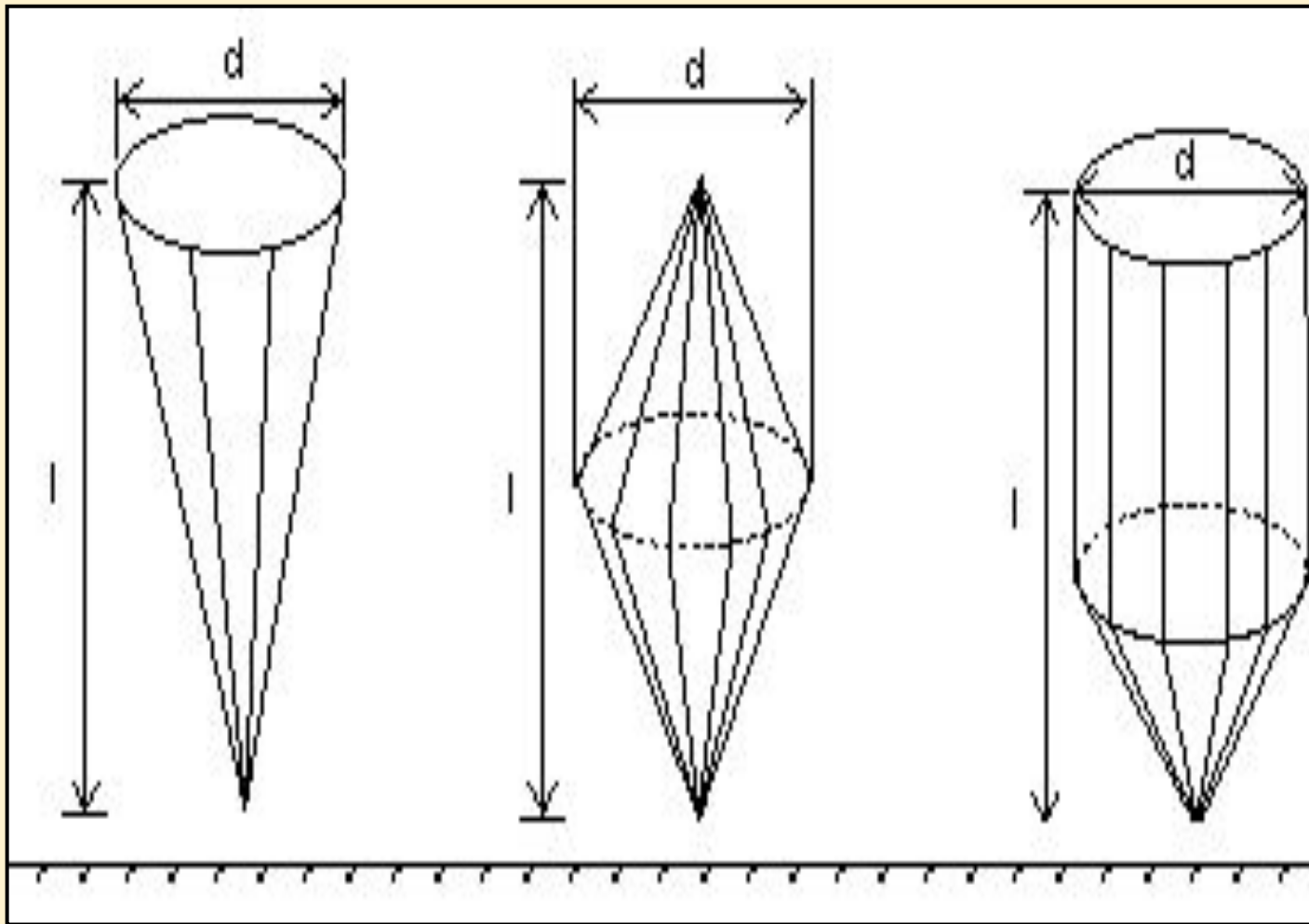
**Несимметричный петлевой вибратор.** Его ДН совпадает с диаграммой направленности классического штыря.

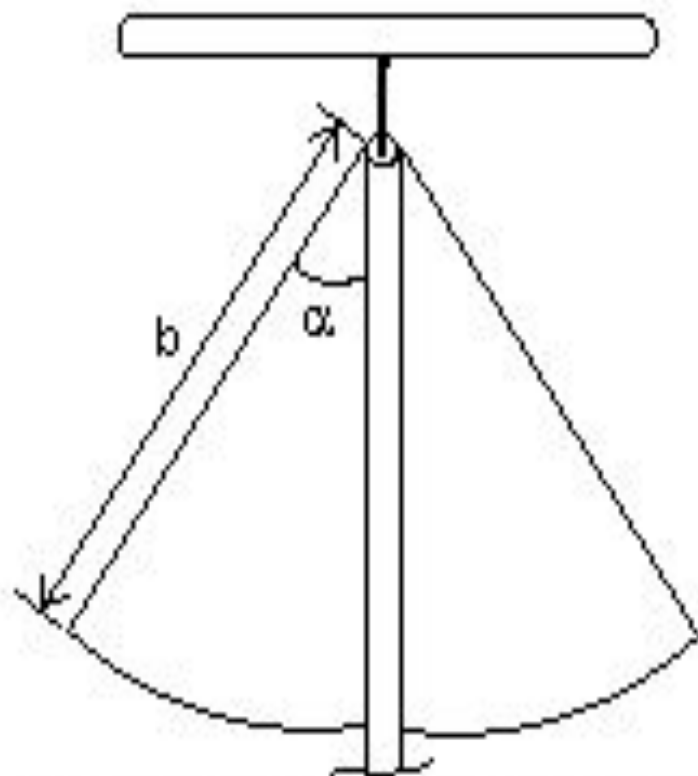
Подбором толщин  $a_1$  и  $a_2$  можно изменять его входное сопротивление в широких пределах.



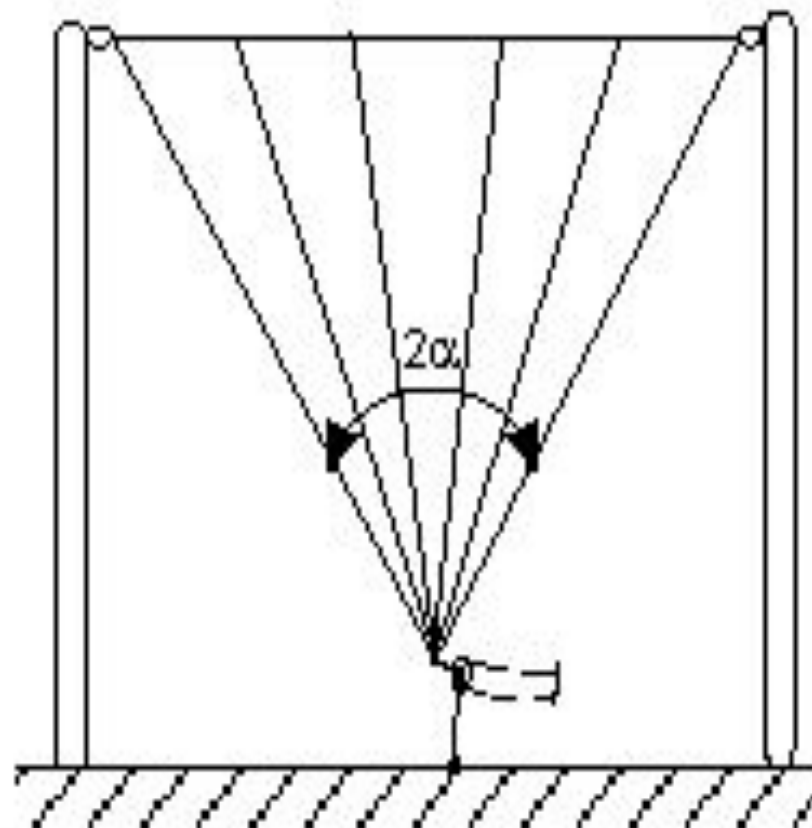
**Широкодиапазонные несимметричные вибраторы** могут быть коническими, ромбическими, цилиндрическими, сплошными и решетчатыми. Перекрытие диапазона рабочих частот зависит от отношения  $d//$ . Чем оно больше, тем широкополоснее вибратор.

**Конические антенны** – частный случай широкополосных вибраторов. Поле излучения создается токами, обтекающими конус, а диск играет роль экрана и почти не излучает. При угле  $\alpha=60^\circ$  достигается наибольший коэффициент перекрытия диапазонов, равный примерно **5**, при **КБВ = 0,5** в фидере с волновым сопротивлением **50 Ом**.





а) Дисконусная антенна УКВ

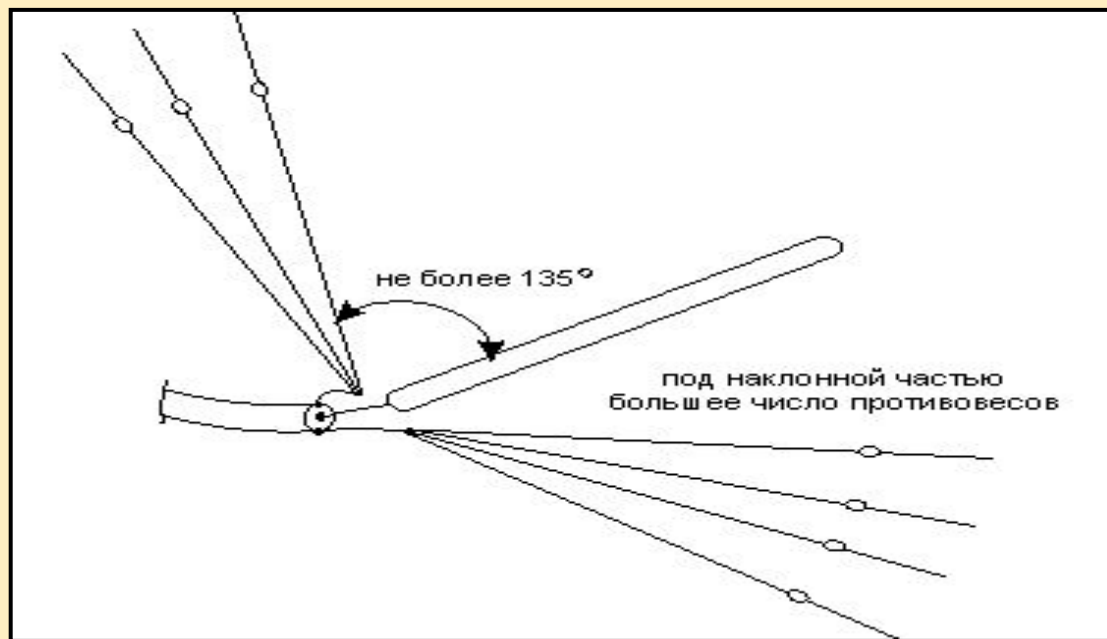


б) Конусная антенна КВ

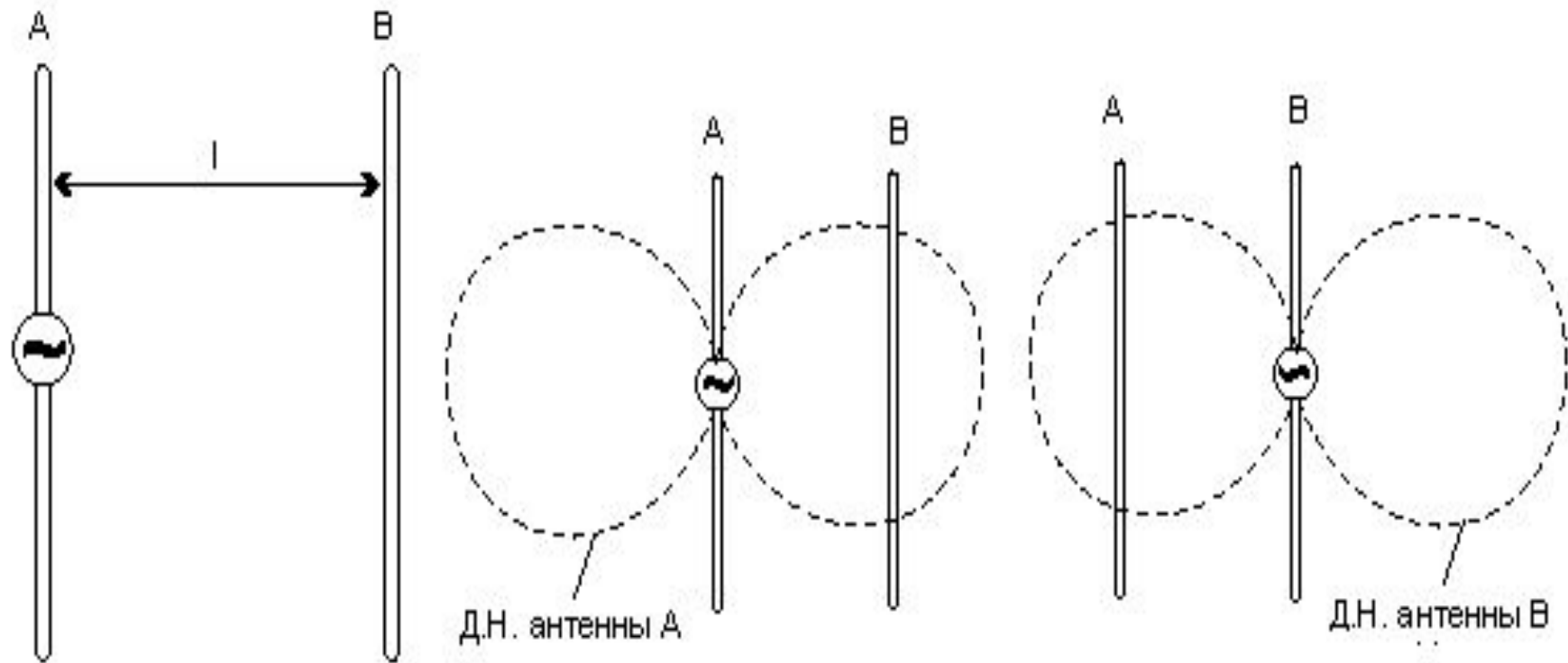
**Работа штыря, расположенного наклонно относительно Земли.** Антенная система остается работоспособной, однако, ДН исказится. Можно указать несколько правил:

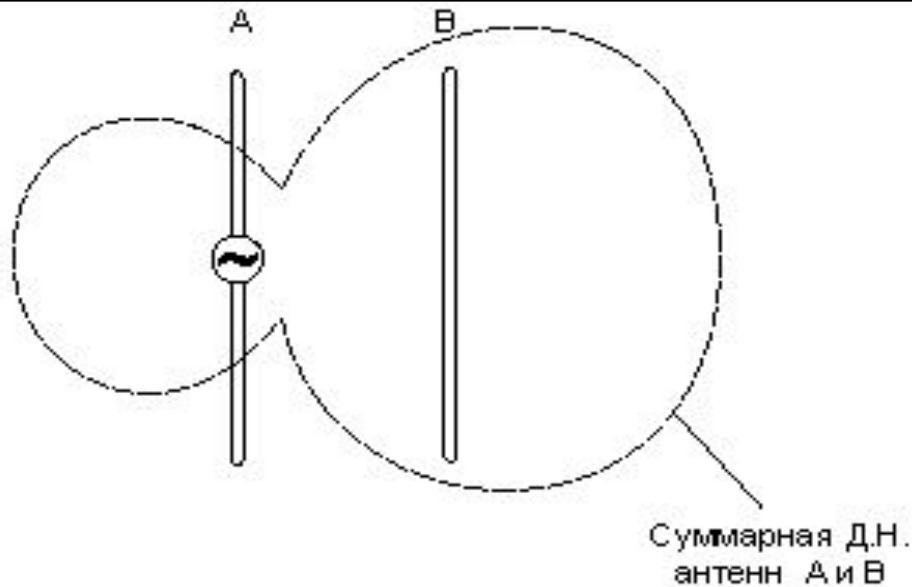
Располагать по возможности больше противовесов под той частью антенны, которая наклонена (этим мы уменьшим влияние Земли).

По возможности поднимать противовесы так, чтобы они образовывали с антенной угол не более  $135^\circ$ .

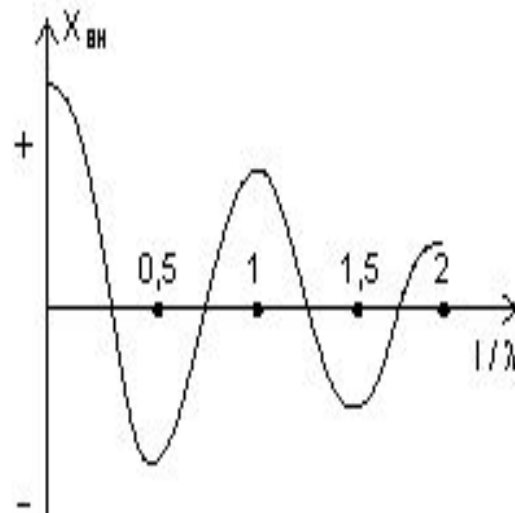
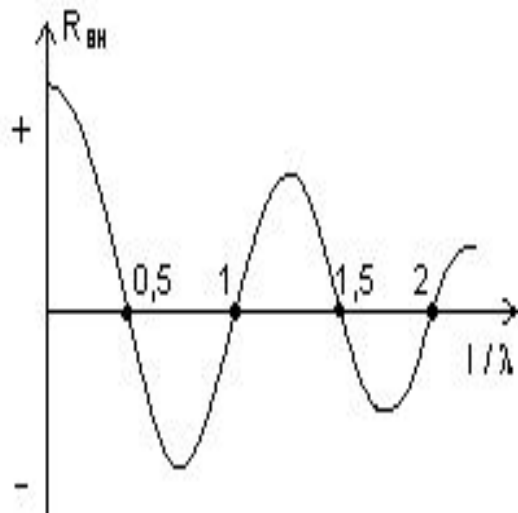


Предположим, что возбуждается антенна А, рядом с ней имеется антенна В. ЭМВ, излученная антенной А, наводит токи в антенне В, которая в свою очередь благодаря этому излучает. Излучение антенны В, также влияет на антенну А. Антенна А и антенна В имеют каждая свою ДН.



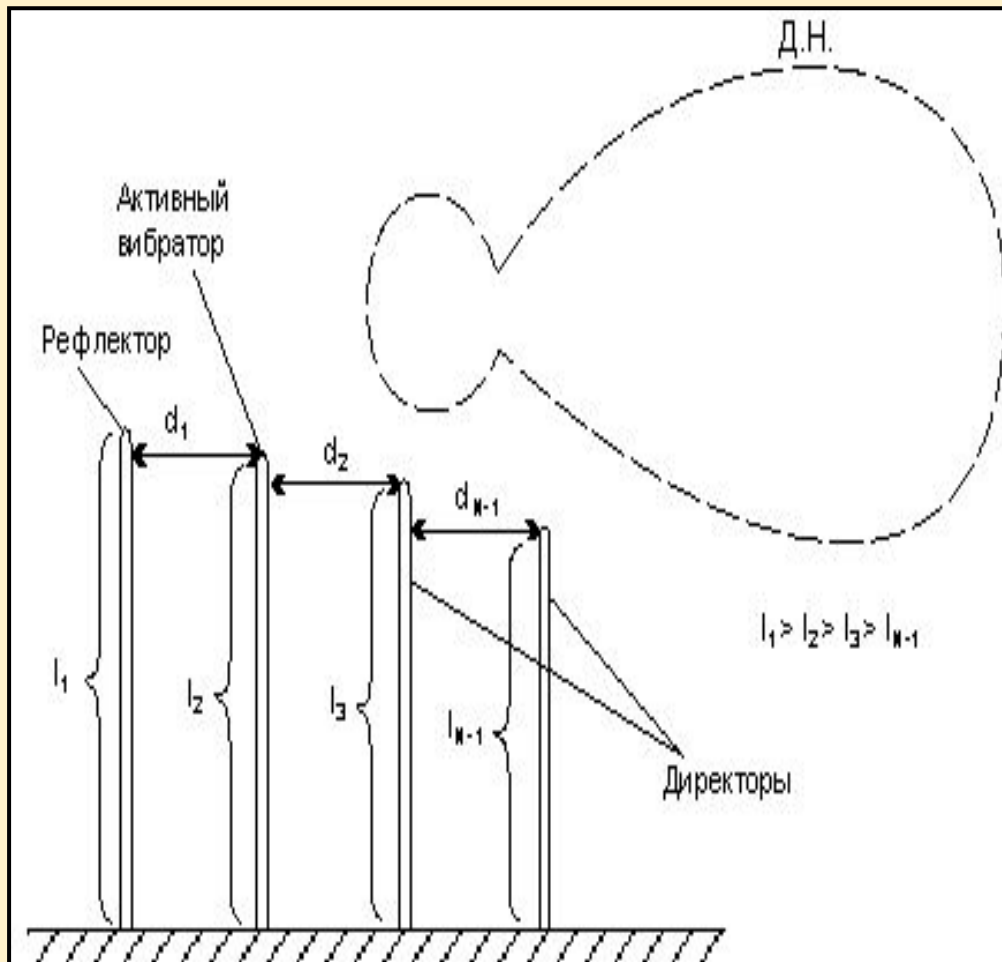


Общая ДН будет суммой двух ДН.  
 Если антенна А имеет входное сопротивление  $R$ , то при размещении рядом антенны В ее полное сопротивление будет равно  $R_a + R'_{bb}$ , где  $R'_{bb}$  – вносимое антенной В сопротивление.

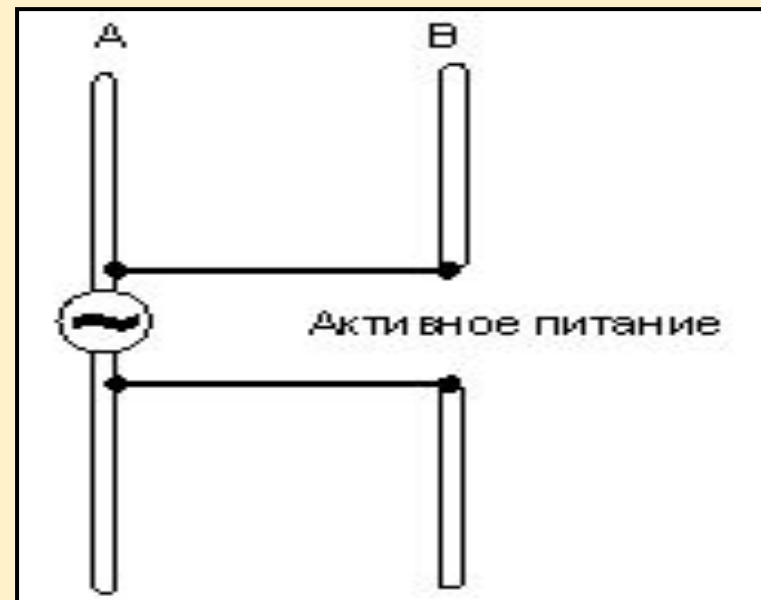


Видно, что вносимое сопротивление изменяется по синусоидальному закону в зависимости от расстояния между вибраторами.

Пример - антенна включает один активный и пассивные вибраторы.



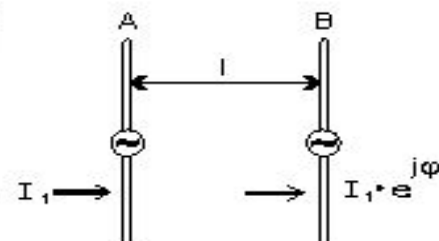
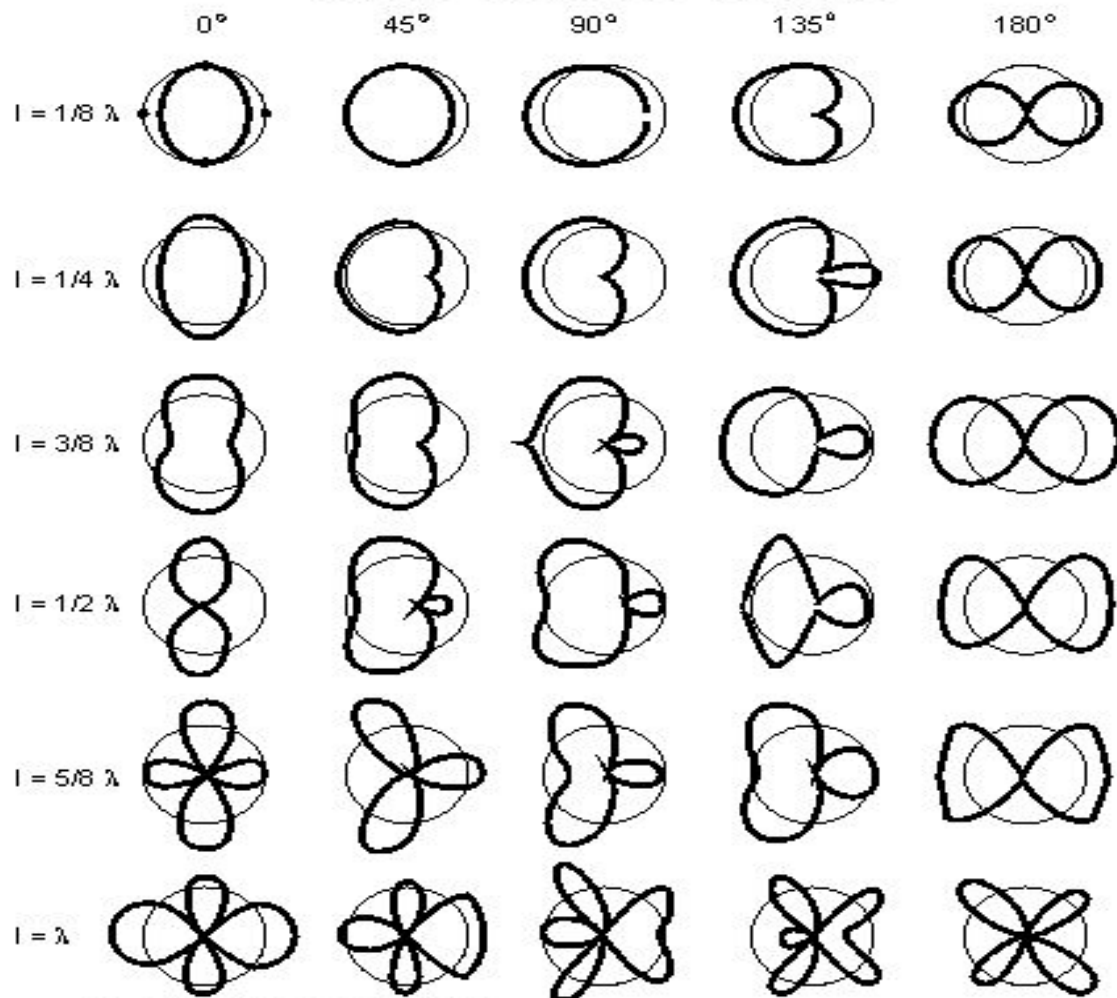
Есть еще один способ для создания заданной ДН. Он заключается в активном питании вибраторов токами разных фаз. Изменяя разность фаз можно получить любую ДН антенной системы.





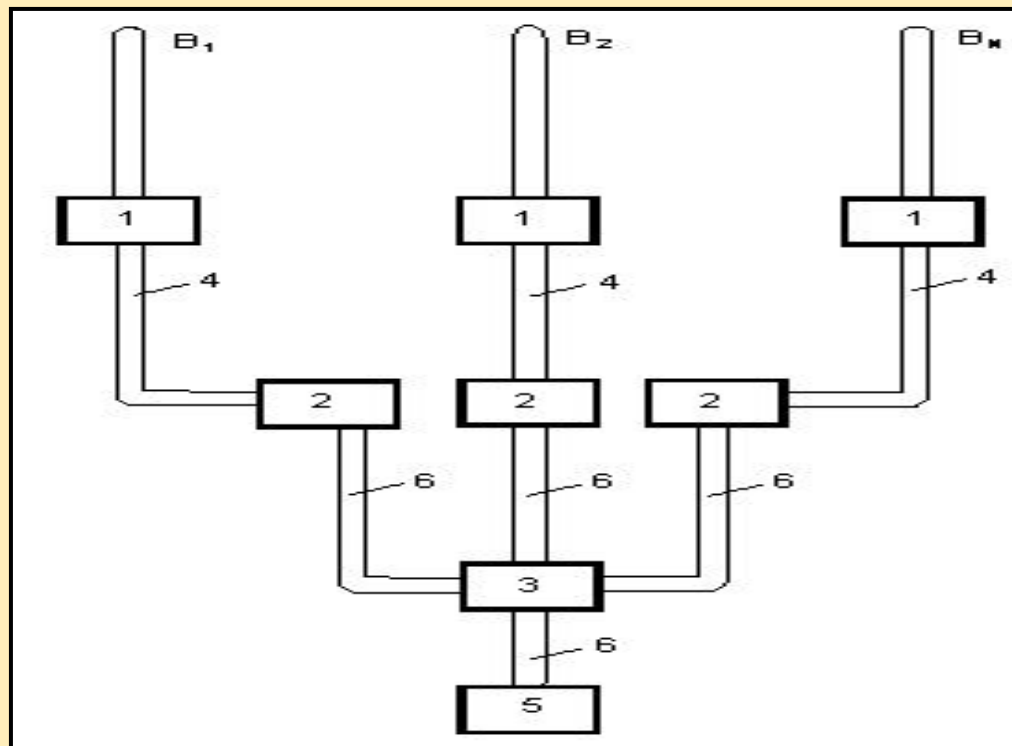
# Диаграммы направленности антенной системы двух вибраторов

Фазовый сдвиг токов вибраторов

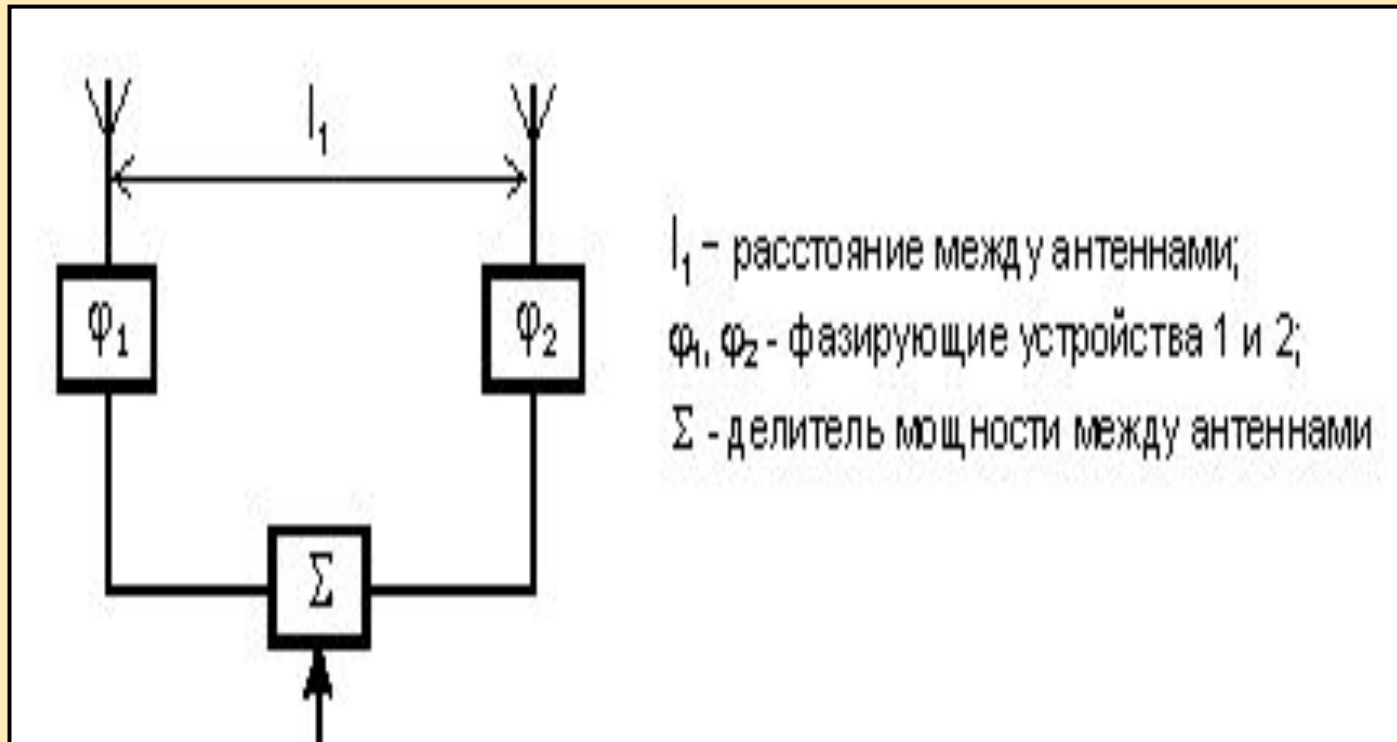


Д.Н. вертикальных вибраторов в горизонтальной плоскости

**Фазирuемые вертикальные антенные системы.** Выше было показано, что фазирuемые вертикальные антенны могут работать в широком диапазоне и могут обеспечивать изменяемую ДН. Это обусловило их широкое использование в военной радиосвязи. Обычно расстояние между вибраторами остаётся неизменным, хотя существуют антенные системы с изменяемым расстоянием между вибраторами.



**Широкополосная фазированная вертикальная антенна с регулируемой ДН.** В фазированной направленной антенне все ее элементы запитываются от общего генератора с некоторым сдвигом фаз.



При этом, в зависимости от разницы питающих вибраторы фаз и расстояния между вибраторами, можно получить практически любую ДН.

При расстоянии между вибраторами от четверти до целой длины волны можно практически осуществить сканирование пространства вокруг антенной системы на  $360^\circ$ , при этом изменяя лишь разницу фаз, питающих вибраторы, и оставляя неизменным расстояние между ними.

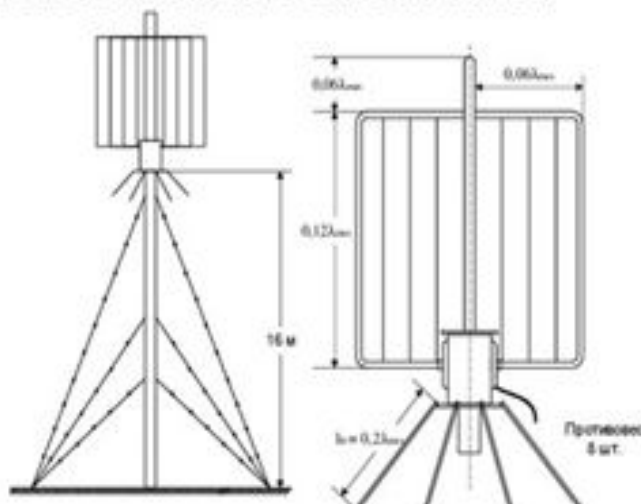
На рисунках ниже приведены примеры применения штыревых антенн в военных системах радиосвязи.



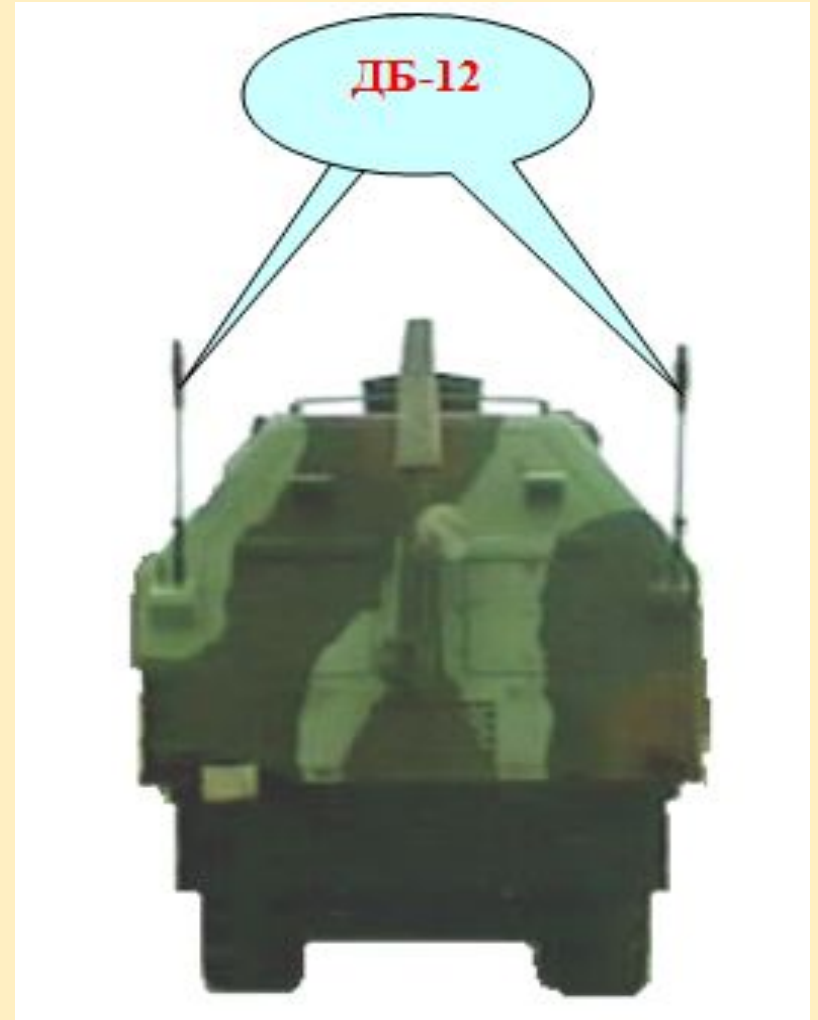
## Широкодиапазонная антенна (ШДА)

предназначена для обеспечения радиосвязи земной волной в диапазоне частот 30...60,0 МГц на дальности до 80 км. Антенна имеет круговое излучение с вертикальной поляризацией в горизонтальной плоскости. Исполняется в двух вариантах: в виде объемного или плоского несимметричного вертикального вибратора.

Антенна устанавливается на вершине телескопической мачты и подключается к ВЧ разьему коаксиальным кабелем РК-75.













Рассмотрены принципы построения штыревых антенн, их характеристики и особенности применения в различных приложениях. Показана зависимость характеристик и направленных свойств штыревых антенн от их размеров и высоты поднятия над поверхностью Земли. Рассмотрены принципы использования штыревых антенн для получения направленного излучения ЭМВ. Проведен анализ принципов согласования ША с питающей линией. Показано применение штыревых антенн в военных системах радиосвязи.

## Учебные цели:

Изучить методы расчета поля излучения антенн в дальней зоне, основанные на принципе суперпозиции, назначение, характеристики устройство и применение штыревых антенн.

**Учебные цели занятия достигнуты**

**Тема следующего занятия: ГЗ №7 «Симметричный вибратор в свободном пространстве»**

1. Закрепить учебный материал, изученный на лекции. Использовать литературу: Соловьев В.В, Велигоша А.В., Непочатых С.В. Распространение радиоволн и антенно-фидерные устройства. Часть 2. Антенно-фидерные устройства: учебное пособие. - ФВА РВСН им. Петра Великого. 2020. С. 51-60. Литература [2].

2. Решить задачу: определить границу дальней зоны при условии:

- длина антенны симметричный вибратор 46 м, частота 12 МГц;
- длина антенны симметричный вибратор 26 м, частота 8 МГц;
- длина антенны симметричный вибратор 18 м, частота 6 МГц;

3. Подготовиться по вопросам лекции к опросу на последующих занятиях.

Для подготовки использовать вопросы:

3.1. Поясните принцип суперпозиции при расчете поля излучения антенн.

3.2. Поясните, как проводится расчет поля излучения антенн на основе принципа суперпозиции?

3.3. Поясните, в чем состоит отличие расчета поля излучения апертурных антенн от линейных?

3.4. Доложите особенности расчета поля антенн в дальней зоне.

3.5. Дайте общую характеристику штыревым антеннам.

3.6. Поясните особенности применения штыревых антенн.