

Антенны для систем мобильной связи

Качество приема сигналов систем мобильной связи (СМС) во многом зависит от качества используемых антенн. Это сравнимо с приемом эфирных сигналов наземного телевизионного вещания (НТВ). Именно коэффициент усиления антенны G_A в основном определяет отношение сигнал/шум (S/N – Signal/Noise). А именно от параметра S/N в основном и зависит «дальнобойность» приемной системы. Помимо приемной антенны, этот параметр зависит также и от выбранного частотного диапазона и от коэффициента шума репитера.

Действительно, любой репитер (аналогия – мачтовый усилитель при приеме сигналов НТВ) будет усиливать как входной полезный сигнал, так и все шумы с помехами, поступающими на его вход. Разница в уровнях полезного сигнала и уровнем шумовой мощности останется неизменной. Более того, реальный репитер будет еще и добавлять собственную шумовую мощность. Поэтому, единственным устройством, способным увеличить S/N является только антенна. На этом устройстве никак нельзя экономить. Лучше приобрести более дешевый репитер, чем экономить на антенне.

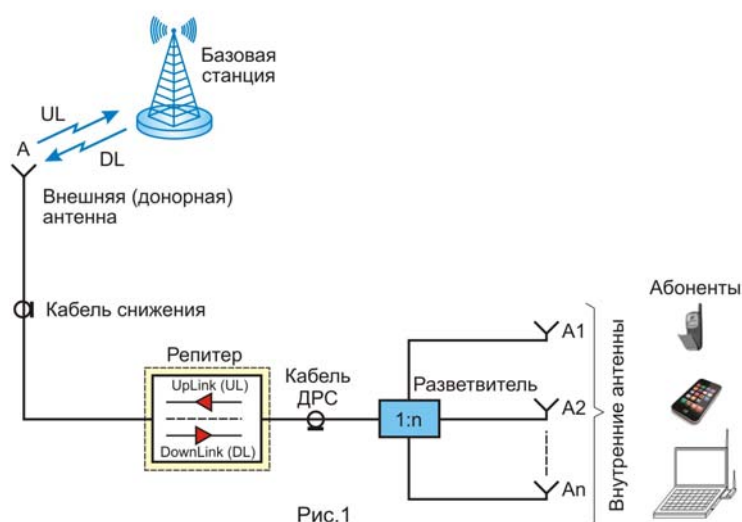
Для удобства восприятия излагаемого материала (а в общем случае он очень обширен) разобьем его на несколько разделов.

Типы антенн

Приемные антенны преобразуют энергию электромагнитных волн в высокочастотную (ВЧ) энергию, поступающую по кабелю снижения к репитеру¹ или Wi-Fi роутеру. Главная особенность любых антенн заключается в том, что они являются пассивными взаимными устройствами. Иными словами, они обладают одинаковыми параметрами на прием и на передачу. Например, если коэффициент усиления антенны на приеме составляет 14 дБ, то и на передачу он также составляет 14 дБ.

По месту установки антенны делятся на (см. рис.1):

- наружные, предназначенные для установки вне помещений. Такие антенны также часто именуют внешними или донорными;
- комнатные (внутренние), предназначенные для установки внутри помещения.



Оба типа антенн в свою очередь могут использовать развивающуюся технологию MIMO (см. ниже по тексту). Пока же остановимся на традиционных антеннах.

¹ Репитер по своей структуре является двусторонним ретранслятором

Самым главным параметром, предъявляемым к внешним антеннам является коэффициент усиления. Все другие параметры являются второстепенными. А вот к комнатным антеннам дополнительно предъявляются такие параметры, как ширина диаграммы направленности (см. ниже по тексту), удобство крепления и внешний вид.

Параметры антенн

Диапазон рабочих частот является самым первым параметром, на который обращают внимание при выборе антенны. По определению рабочий диапазон частот – это интервал частот, в пределах которого наблюдается изменение мощности принимаемых сигналов не более чем в два раза (3 дБ). В пределах рабочего диапазона частот должны выдерживаться все заявляемые параметры.

Не следует выбирать вседиапазонную антенну (например, от 790 МГц до 2700 МГц, см. раздел [диапазоны частот мобильной связи](#)). Такая антенна будет обладать заниженными эксплуатационными параметрами. Сконструировать такую антенну очень сложно из-за ее широкополосности. Лучше сразу ориентироваться на нужный диапазон (см. раздел [диапазоны частот мобильной связи](#)). Здесь же приведем основные и наиболее часто используемые диапазоны частот.

Диапазон 900 МГц:

790-862 МГц – частоты 4G LTE (Band 20). Интенсивно осваиваемый диапазон в регионах с низкой и средней плотностью населения;

890-960 МГц – частоты GSM-900. Самый первый частотный диапазон, с которого началось освоение систем мобильной связи (СМС).

Диапазон 1800 МГц:

1710-1880 МГц – стандарт связи GSM-1800 (DCS-1800);

1920-2170 МГц – (Band 3) 3G стандарты HSPA/HSDPA/UMTS-2100. Очень широко используемый диапазон по всем регионам.

Диапазон 2600 МГц:

2500-2690 МГц (Band 7) - стандарт 4G, наиболее интенсивно развиваемый в средних и крупных городах или в регионах с высокой плотностью застройки.

Дополнительно имеется выделенный диапазон (Band 31) 452,5-467,5 МГц, в котором в настоящее время успешно развивается Ростелеком (бренд Tele2).

Коэффициент усиления антенны (G_A) показывает, во сколько раз уровень наводимого в ней сигнала превышает уровень сигнала на эталонной антенне. В качестве эталонной антенны согласно стандарта EN 50083-5 рекомендован полуволновой вибратор (точно также и по российскому стандарту). Коэффициент усиления антенны по напряжению (или по «полю») можно определить как отношение напряжения, развиваемого антенной на согласованной нагрузке, к напряжению, развиваемому на той же нагрузке согласованным с ней полуволновым вибратором. Обе антенны считаются расположенными в той же точке электромагнитного поля и ориентированными на максимум приема. Чаще используется понятие коэффициента усиления по напряжению.

Применительно к СМС, более удобным оказывается коэффициент усиления антенны по отношению к изотропному излучателю (полностью ненаправленная антенна, имеющая пространственную диаграмму направленности в виде сферы). Реально таких антенн нет, но

она является удобным эталоном, с помощью которого можно сравнивать параметры существующих антенн. Коэффициент усиления полуволнового вибратора относительно изотропной антенны равен 2,15 дБ (1,28 раза по напряжению или в 1,64 раза по мощности). Следовательно, если возникает необходимость пересчитать коэффициент усиления антенны по напряжению или по мощности относительно изотропной антенны, необходимо разделить известную величину на 1,28 или 1,64, и получим коэффициент усиления относительно полуволнового вибратора. Если коэффициент усиления антенны G_A указан в децибелах относительно изотропной антенны (дБи), то для пересчета коэффициента усиления относительно полуволнового вибратора (дБд) необходимо вычесть 2,15 дБ.

Например, если на антенну СМС заявлен коэффициент усиления 12,5 дБи, то ее реальный коэффициент усиления относительно полуволнового вибратора составит 10,35 дБд.

Также следует знать, что коэффициент усиления антенны снижается по мере понижения частоты. Значение коэффициента усиления антенны, как правило, указывают только в самой верхней точки диапазона рабочих частот (именно в этой точке коэффициент усиления антенны максимален). При проведении простейших оценочных расчетов можно считать, что коэффициент усиления антенны снижается со скоростью порядка 6 дБ/октава (Женевская международная рекомендация ETSI TR-101.190). Для удобства пользования коэффициент усиления на любой частоте можно посчитать по формуле:

$$G_{A[\text{дБ}]} = G_{A0[\text{дБ}]} - 18 \lg \left(\frac{f_0}{f_x} \right), \quad (1)$$

где G_A – коэффициент усиления антенны на исследуемой частоте f_x (в дБ) и G_{A0} – искомое значение коэффициента усиления антенны на известной (верхней) частоте f_0 .

Так, например, разница в коэффициентах усиления конкретной антенны на частотах 2,7 ГГц и 0,9 ГГц согласно (1) составит около 8,6 дБ (в общем случае 6,3...9,5 дБ !). Это очень большая величина. Именно по этой причине мы не рекомендовали Вам использовать всдиапазонные антенны.

Диаграмма направленности (ДН) характеризует зависимость ЭДС, наведенной в антенне электромагнитным полем, от ориентации ее в пространстве. Обычно она строится в полярной (рис.2а) или в прямоугольной (рис.2б) системах координат. Лепесток, соответ-

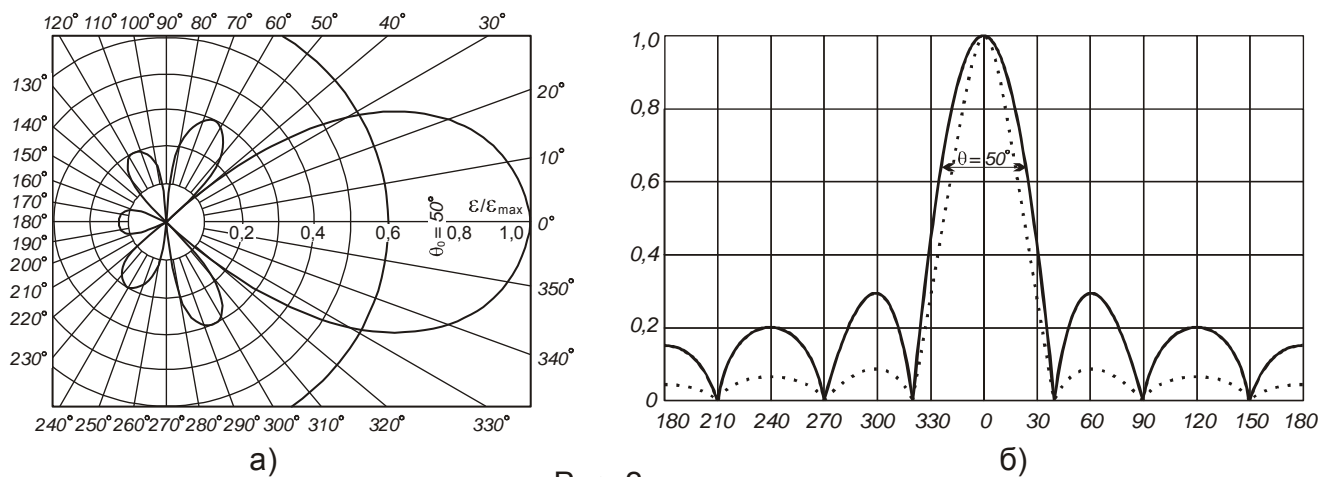


Рис. 2

ствующий максимальному сигналу или нулевому направлению, называется основным или главным, остальные называются боковыми или задними. Основным параметром ДН является

угол раствора (ширина ДН) главного лепестка в обеих плоскостях, в пределах которого ЭДС, наведенная в антенне электромагнитным полем, спадает до уровня 0,707 (или мощность уменьшается до уровня 0,5 (-3 дБ) относительно максимального значения) Чем меньше ДН (в градусах), тем больше направленность.

Форма диаграммы направленности зависит от типа и конструкции антенны. Диаграмма направленности полуволнового вибратора в горизонтальной плоскости напоминает восьмерку, а в вертикальной – круг. Подавляющее большинство внешних антенн имеют ярко выраженный главный лепесток (т.е. более узкую ДН относительно полуволнового вибратора). С увеличением коэффициента усиления антенны главный и побочные лепестки сужаются, а направленные свойства антенны увеличиваются. Дополнительно отметим, что с повышением рабочей частоты в диапазонных антеннах, их коэффициент усиления увеличивается.

Если для внешней антенны ширина ДН не имеет принципиального значения (тем не менее, желательно иметь более узкую ДН, о чем подробнее будет изложено в материалах по репитерам), то для комнатных антенн ширина ДН имеет важное значение, т.к. по ней можно судить о зоне действия покрытия СМС.

В общем случае ширина ДН любой антенны для вертикальной (V) и горизонтальной (H) плоскостей разные². Однако, при коэффициенте усиления антенны более 12 дБи, эта разница становится малой, и с увеличением коэффициента усиления G_A всё более и более снижается. Приближенная практическая формула для расчета ширины ДН в обеих плоскостях отсчета имеет вид:

$$\varphi_{0[\text{град}]} = \frac{175}{\sqrt{G_{A[\text{дб}]}}} \quad (2)$$

Практика показывает, что погрешность формулы (2) в большинстве случаев не превышает 5-20%, что более чем достаточно при проведении расчетов СМС в целом в самых различных инсталляциях. На рис.3 показана зависимость ширины ДН в зависимости от коэффициента усиления антенны.

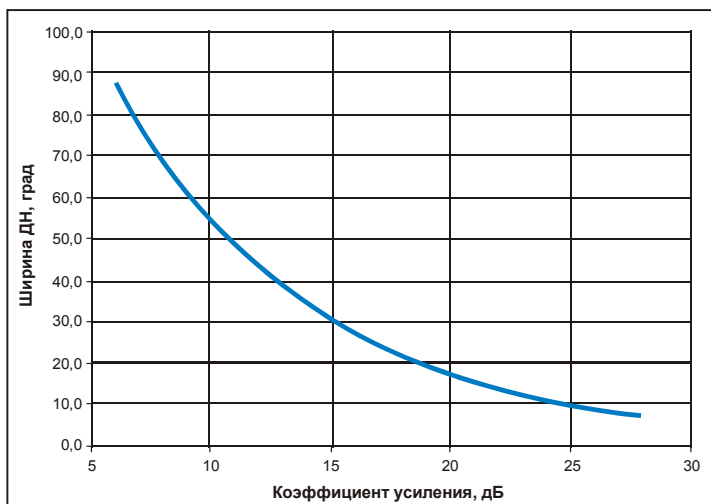


Рис.3

² В СМС используется вертикальная поляризация, в телевидении – горизонтальная поляризация, как менее чувствительная применительно ко многим видам переотражений.

Коэффициент защитного действия (КЗД) определяет помехозащищенность антенны. КЗД – это отношение напряжения, получаемого от антенны на согласованной нагрузке при приеме с заднего или бокового направления ($U_{зад}$) к напряжению на той же нагрузке при приеме с главного лепестка ($U_{гл}$), определяемое в децибелах по формуле:

$$KЗД_{[дБ]} = 20 \lg \left(\frac{U_{зад}}{U_{гл}} \right) \quad (3)$$

В условиях городского приема при наличии множества переотражений КЗД является значимым параметром при выборе типа внешней антенны.

Входное сопротивление антенны – это параметр, который характеризует ее импедансные свойства в точке питания (место подключения фидера – кабеля снижения). Отдача мощности из антенны в нагрузку определяется отношением между входным сопротивлением антенны, которое может рассматриваться как ее внутреннее сопротивление, и сопротивлением нагрузки¹. В общем случае входное сопротивление антенны является комплексной величиной ($Z_{вх}$), состоящей из активной ($R_{вх}$) и реактивной ($X_{вх}$ – емкостной или индуктивной) составляющих. Чисто активным сопротивление становится только при определенных соотношениях между размерами антенн и частотой (точки резонанса). Максимальная мощность в нагрузку (например, от антенны в репитер и обратно) будет соответствовать равенству входного сопротивления антенны и репитера.

В последнее время у многих компаний-производителей наблюдается тенденция плавного перехода с 50 Ом (как правило, это коннекторы N-типа) на 75 Ом (традиционные F-коннекторы). Следует считать такую тенденцию правильной и технически обоснованной. Обоснования можно посмотреть в основном [разделе по кабелям](#). Здесь же рассмотрим только потери на рассогласование между кабелем снижения (75 Ом), антенной и репитером.

Степень рассогласованности принято характеризовать или коэффициентом возвратных потерь (R), или коэффициентом отражения (Γ) или коэффициентом стоячей волны (КСВ или $K_{ст.в}$), связанных между собой соотношениями:

$$R_{[дБ]} = 20 \lg |\Gamma|^{-1} = 20 \lg \left(\frac{K_{cm.U} + 1}{K_{cm.U} - 1} \right) \quad (4)$$

Эти коэффициенты, исходя из своих определений, лежат в пределах:

$$0 \leq |\Gamma| \leq 1; \quad 1 \leq K_{cm.U} < \infty.$$

В течении многих десятилетий в России степень согласованности было принято характеризовать в K_{CB} , что логично с точки зрения его отсчета. В последнее время тенденция приоритета отсчетов изменилась, и производители стали выполнять требования европейского стандарта CENELEC EN-50083, который обязывает выражать степень согласованности как коэффициент возвратных потерь (R).

Величина потерь на рассогласование, выраженная через коэффициент отражения (Γ), определяется как

¹ Для СМС принято стандартное значение 50 Ом, для ТВ систем – 75 Ом.

$$\alpha_{[\text{дБ}]} = 10 \lg \left(\frac{1}{1 - |\Gamma|^2} \right) \quad (5)$$

В табл.1 приведены сравнительные характеристики коэффициентов согласования при их различных численных значениях и соответствующие им коэффициенты рабочих затуханий.

Таблица 1

R , дБ	6	8	10	14	16	18	20	26
$ \Gamma $, ед	0,5	0,4	0,32	0,2	0,16	0,13	0,1	0,05
$K_{\text{см.}U}$, ед	3,0	2,33	1,94	1,5	1,38	1,29	1,22	1,11
α , дБ	1,26	0,86	0,46	0,18	0,11	0,07	0,04	0,01

Из табл.1 видно, что даже при $R=10$ дБ ($K_{\text{СВ}}=1,94$ и $\Gamma=0,32$) потери на рассогласование не превышают 0,5 дБ. Следовательно, суммарные потери (т.е. антенна – кабель и кабель - репитер) не превысят 1 дБ. Причем, эти потери никак не связаны с длиной кабеля (не путать с потерями в кабеле, зависящими от погонных потерь на заданной частоте и длины кабеля!).

Исходя из этих математических рассуждений можно судить о целесообразности использования именно 75-тиомного оборудования (антенны, кабель и репитер).

Место установки антенны. Не вдаваясь в сложные математические расчеты (это сделано в системных расчетах), можно с уверенностью сказать, что по полной аналогии с НТВ, «дальнобойность» СМС в очень сильной степени зависит от высоты подъема внешней антенны. Чем выше установлена антенна – тем больше напряженность электромагнитного поля и тем более высокий уровень принимаемого сигнала будет на выходе антенны. Данный критерий является основополагающим. А коэффициент усиления антенны является вторым по значимости критерием в «дальнобойности» (т.е. возможности работать с очень слабыми сигналами) СМС в целом.

Необходимо также знать, что входное сопротивление антенны также зависит от объектов, находящихся в ееблизи. Такие предметы влияют на распределение поля (а, следовательно, и на форму ДН антенны) в пространстве. Это необходимо учитывать при выборе места установки антенны.

Ветровая нагрузка является параметром, характеризующим величину изгибающего момента на мачту при воздействии ветра. Этот параметр зависит от «парусности» антенны и определяет надежность антенны. Чем меньше численное значение ветровой нагрузки, тем лучше. Согласно CENELEC EN 50083-1, если высота установки антенного комплекса более 20 м от поверхности земли, значения ветрового давления могут достигать 1100 N/m^2 (скорость ветра 42 м/с или 150 км/час).

К сожалению, данный критерий носит сложный и расплывчатый характер. Тем не менее, в целях общих представлений, имеет смысл кратко рассмотреть его.

Ветровая нагрузка на антенную систему может определяться из следующего выражения (рис.4):

$$W = c \cdot p \cdot A, \quad (6)$$

где: W – ветровая нагрузка, в N ;
 c – нагрузочный коэффициент;
 p – ветровое давление в паскалях (N/m^2);
 A – площадь компонентов антенны (m^2).

Значение нагрузочного коэффициента c принимается:

$c = 1,37$ при ветровом давлении до $1100 N/m^2$;
 $c = 1,2$ при ветровом давлении свыше $1100 N/m^2$.

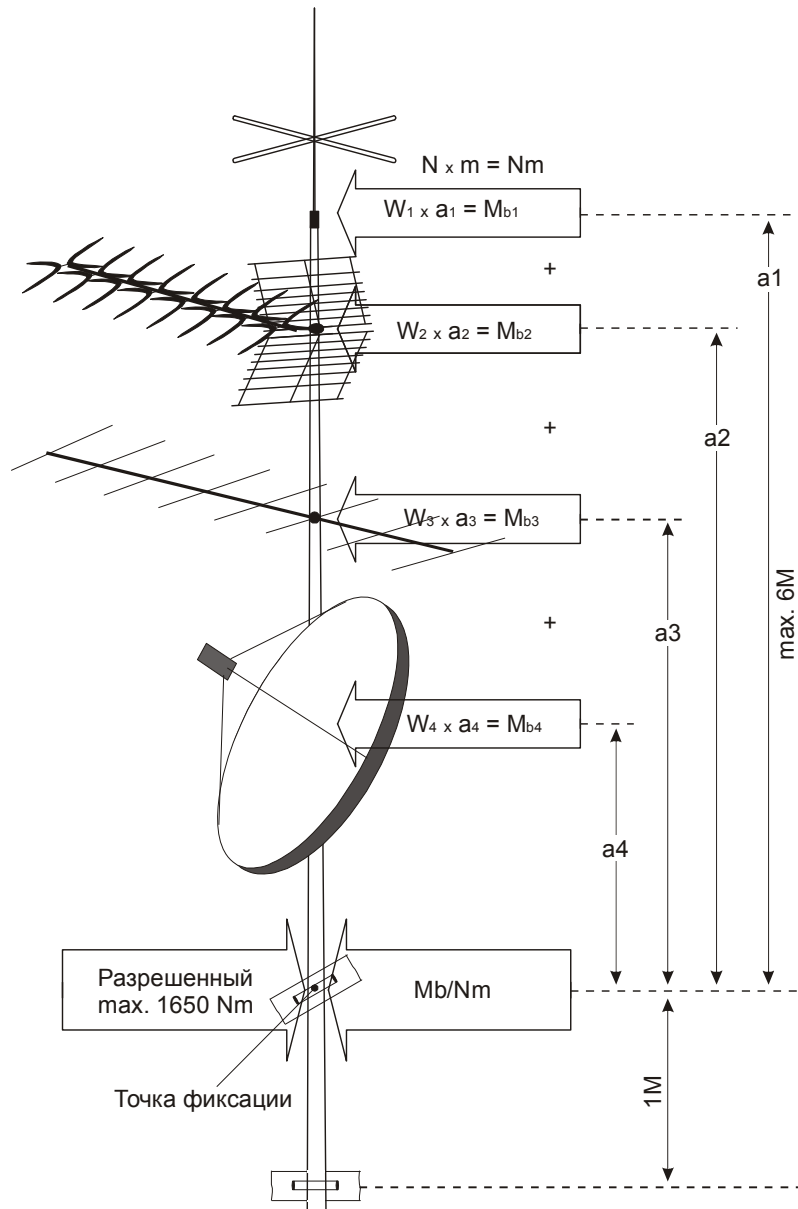


Рис. 4

Нагрузка за счет снега и дождя здесь не учтена. Изгибающий момент в точке фиксации, указанной на рис.4, определяется из выражения:

$$M_B = W_1 \cdot a_1 + W_2 \cdot a_2 + W_n \cdot a_n, \quad (7)$$

где M_B – изгибающий момент в $N \cdot m$;
 $W_1, W_2 \dots W_n$ – соответствующие ветровые нагрузки в N ;

$a_1, a_2 \dots a_n$ – расстояния от антенн до точки фиксации, м.

Для антенных систем с мачтами максимально свободной длины до 6 м, изгибающий момент не должен превышать 1650 $N \cdot м$. Сюда также должна включаться ветровая нагрузка мачты. Фиксированная часть мачты должна составлять не менее одной шестой свободной длины.

Сталь, из которой изготовлена мачта, должна иметь гарантированный предел расширения, и максимальная нагрузка не должна превышать 90% от предела расширения так, чтобы мачта не сломалась, а только выгнулась. Минимальная толщина стенки мачты в области крепления должна быть не менее 2 мм.

Исходя из выше изложенного, при расчете антенного комплекса (SAT, DVB-T2 и СМС антенны) необходимо обратить внимание на величину максимального изгибающего момента мачты в месте фиксации.

Конструкция антенны является маловажным параметром при ее установке в СМС.

При выборе антенны следует обратить внимание как на удобство установки (предпочтение следует отдать установке на трубу, кронштейн или мачту) так и на долговременную механическую стабильность ее конструкции.

Рассмотрим основные варианты исполнения антенн.

Панельные антенны.

На сегодняшний день такой тип антенн получил наибольшее распространение в силу малых габаритов и ветровой нагрузки при относительно высоком коэффициенте усиления.



Применительно к внутренним антеннам их используют в качестве секторных антенн, для организации покрытия в определенной зоне. Применительно к базовым станциям (БС), антенна представляет собой набор диполей расположенных вертикально в два ряда (напоминаем про вертикальную поляризацию в СМС). Обычно столбцы находятся в левой и правой части антенны, что обеспечивает эффект пространственного горизонтального разнесения.

С целью улучшения сигнала возможно применение поляризационного разнесения. Этого можно достигнуть в том случае если сигнал от БС принимается через две антенны имеющих разную поляризацию диполей.

Всенаправленные антенны применяется несколько реже из-за низкого коэффициента усиления. Обычно они используются в качестве комнатных (внутренних) антенн. Основной особенностью является то, что у такой антенны отсутствует приоритетное направление сигнала.



Излучение происходит равномерно во все стороны, поэтому антенна обладает круговой ДН. Часто такие антенны называют штыревыми, т.к. конструктивно она представляет собой металлический стержень, спрятанный в пластиковый корпус. Длина металлического штыря определяет резонансную длину волны (частоту), на которой данная антенна обладает максимальным коэффициентом усиления. Встречаются и другие конструктивные варианты исполнения таких всенаправленных антенн. Однако изменения в конструкции никак не влияют на их функциональные особенности.

Усеченный параболоид. Является разновидностью параболических антенн.



Применяются реже, чем панельные антенны. Но, применительно к слабым сигналам, мы рекомендуем использовать именно этот тип антенн в силу их высокого коэффициента усиления. Такие антенны строятся по принципу спутниковых (SAT) антенн. Для снижения ветровой нагрузки они выполняются в виде сетки, что дополнительно снижает и их массу. Такие антенны мы рекомендуем к использованию, если расчетное значение коэффициента усиления (см. раздел системных расчетов и репитеров) составляет свыше 20 дБ.

Конструктивно такие антенны выполняются из двух основных частей – рефлектора (иногда именуемого зеркалом или отражателем) и облучателя. Естественно, что сам облучатель крепится на держателе и устанавливается в фокусе рефлектора (полная аналогия с SAT параболическими антеннами). Принцип работы такой антенны основывается на том, что попадающие на рефлектор лучи отражаются (поэтому и зеркало), фокусируются в одной точке (облучателе) и с него попадают на приёмник (кабель с далее установленным репитером). В силу высокого коэффициента усиления (порядка 18-28 дБи), такие антенны обладают узкой ДН (рис.3) и игольчатыми задними и боковыми лепестками.

пестками.

В радиорелейных линиях связи и связи между БС много чаще используются полноценные параболические антенны (как из-за более высоких частот, так и из-за разных поляризаций).

Директорные антенны по своим конструктивным особенностям относятся к традиционным телевизионным антеннам. Они получили широкое применение на частотах 450 МГц (оператор связи Tele2) и 900 МГц. Иногда используются и в диапазоне 1800 МГц. Отличительной особенностью таких антенн является их повернутость на 90° в направлении приема (напомним, что для СМС принята вертикальная поляризация, а для ТВ вещания – горизонтальная поляризация).



Практика использования свидетельствует, что для диапазонов 450 МГц и 900 МГц такие антенны являются весьма эффективными, а их типовой коэффициент усиления составляет 14-20 дБ (пропорционально их габаритам).

составляет 14-20 дБ (пропорционально их габаритам).

Антенны с использованием технологии MIMO.

Наверняка, многие уже слышали про технологию MIMO. В последние годы часто пестрят рекламные проспекты и плакаты, связанные с технологией MIMO, особенно в компьютерных магазинах и журналах. Технологию MIMO можно отнести к достаточно молодым разработкам. Её история начинается в 1984 году, когда был зарегистрирован первый патент на использование данной технологии. Начальные разработки и исследования проходили в компании *Bell Laboratories*, а в 1996 году компанией *Airgo Networks* был выпущен первый MIMO-чипсет под названием *True MIMO*. Наибольшее развитие технология MIMO получила в начале XXI века, когда бурными темпами начали развиваться беспроводные сети Wi-Fi и

СМС стандарта 3G. А сейчас технология MIMO вовсю используется в сетях 4G LTE и Wi-Fi 802.11b/g/ac.

Классический вариант (SISO - Single Input Single Output – один вход один выход) радиосвязи между передатчиком (например, БС) и приемником (репитер) представлен на рис.5.

Требования к пропускной способности СМС (C) постоянно растут. Основными способами увеличения пропускной способности являются увеличение полосы канала и использование более высокого формата модуляции (например, 256QAM вместо 16QAM).

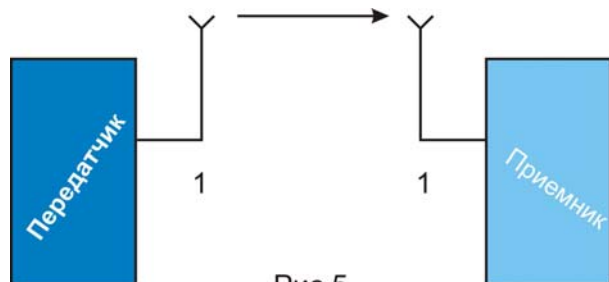


Рис.5

Увеличение полосы канала (Π) ограничено выделенной полосой для данного оператора, а переход на более высокий формат модуляции требует улучшения отношения сигнал/шум (S/N), т.е. требуется работа в уверенной зоне приема, где S/N достаточно высоко (это лишнее свидетельствует, что следует выбирать антенны с максимально возможным коэффициентом усиления и не экономить на этом оборудовании), см. рис.6. Данное утверждение полностью согласуется с известной теоремой Шеннона:

$$C = \Pi \cdot \log_2(1 + S/N). \quad (8)$$

Еще одним способом увеличения пропускной способности C СМС является использование нескольких передающих и приемных антенн (MIMO - Multiple Input Multiple Output – множество входов множество выходов) со специальной дальнейшей обработкой сигнала. Рассмотрим варианты построения систем MIMO.

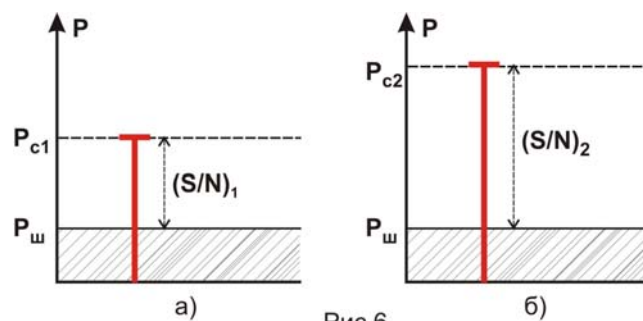


Рис.6

Разнесенный прием (Rx Diversity, SIMO - Single Input Multiple Output – разнесенный прием, один вход множество выходов) - это случай использования большего количества антенн на приемной стороне, чем на передающей. Простейший случай такой системы, когда имеется одна передающая антенна и две приемных, представлен на рис.7 и называется SIMO 1x2.

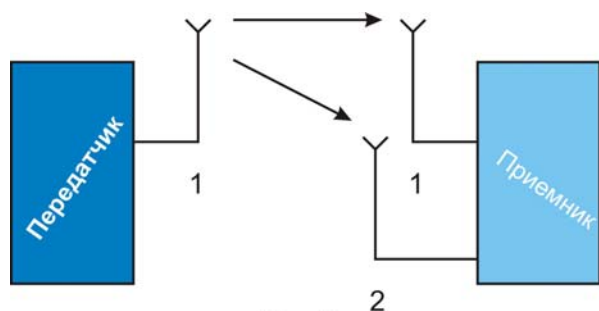


Рис.7

Такой случай не предусматривает специальной подготовки сигнала при передаче, поэтому увеличения пропускной способности не происходит. Однако, повышается надежность приема. Такой вариант построения СМС часто встречается на практике. Абонент (потребитель) приобретает дорогостоящий комплект оборудования MIMO и ожидает увеличения скорости потока Internet. А его фактически не наблюдается. Или наблюдается, но в пределах не выше 5-10%. даже в зоне с уверенным приемом. За счет чего же наблюдается пусть и маленькое, но увеличение скорости потока? Дело в том, что на приемной стороне будут присутствовать два сигнала, и существуют разные способы их обработки. Например, может выбираться сигнал с наилучшим соотношением S/N . Такой метод называется switched diversity (коммутируемое разнообразие). Или сигналы могут складываться, что позволяет повысить соотношение S/N . В общем случае такой метод называется MRC (Maximum Ratio Combining – комбинация максимального отношения).

Такой случай не предусматривает специальной подготовки сигнала при передаче, поэтому увеличения пропускной способности не происходит. Однако, повышается надежность приема. Такой вариант построения СМС часто встречается на практике. Абонент (потребитель) приобретает дорогостоящий комплект оборудования MIMO и ожидает увеличения скорости потока Internet. А его фактически не наблюдается. Или наблюдается, но в пределах не выше 5-10%. даже в зоне с уверенным приемом. За счет чего же наблюдается пусть и маленькое, но увеличение скорости потока? Дело в том, что на приемной стороне будут присутствовать два сигнала, и существуют разные способы их обработки. Например, может выбираться сигнал с наилучшим соотношением S/N . Такой метод называется switched diversity (коммутируемое разнообразие). Или сигналы могут складываться, что позволяет повысить соотношение S/N . В общем случае такой метод называется MRC (Maximum Ratio Combining – комбинация максимального отношения).

Разнесенная передача (Tx Diversity, MISO - Multiple Input Single Output – разнесенная передача, множество входов один выход) - это случай использования большего количества антенн на передающей стороне, чем на приемной. Наиболее распространенный случай на практике, когда абонент даже не подозревает о модернизации БС. Простейший случай такой системы, когда передающих антенн две, а приемная одна, представлен на рис.8 и называется MISO 2x1.

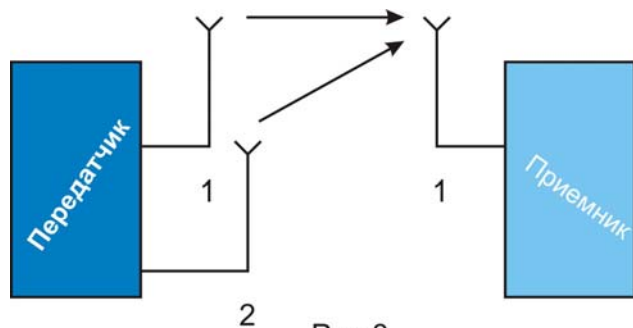


Рис.8

Как и SIMO, MISO не позволяет увеличить пропускную способность канала (C), но повышает надежность передачи. В то же время, использование MISO подразумевает дополнительную обработку сигнала на самой БС. Для формирования надежного сигнала используется пространственно-временное кодирование. В этом случае копия сигнала передается не только с другой антенны, но и в другое время. Также может использоваться пространственно-частотное кодирование.

Пространственное уплотнение (Spatial Multiplexing, MIMO - Multiple Input Multiple Output) предусматривает использование нескольких антенн на передающей стороне и нескольких антенн на приемной (рис.9). В отличие от предыдущих вариантов - MISO и SIMO, описанных выше, данный вариант направлен на увеличение скорости передачи цифрового потока. Поэтому MIMO используется для передачи данных мобильным станциям, которые находятся в зонах с уверенным приемом, в то время, как варианты MISO и SIMO используются для передачи данных мобильным станциям (МС), которые находятся в зонах со значительно более плохими условиями приема (т.е. в зонах неуверенного приема).

Для того, чтобы повысить скорость передачи данных в случае с MIMO, входной поток данных разбивают на несколько потоков (в простейшем случае – на два потока), каждый из которых независимо передается с отдельной антенны (конструктивно как передающие, так и приемные антенны выполняются в виде единого моноблока). На рис.9 представлена обобщенная СМС MIMO с m передающими антеннами и с n приемными антеннами.

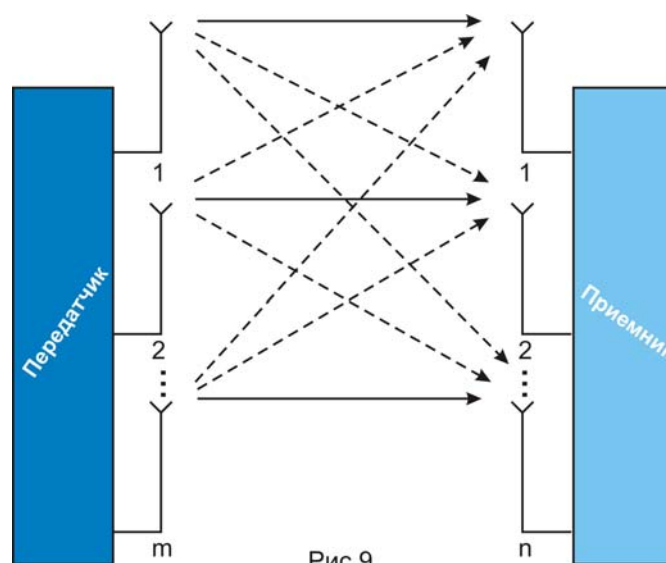


Рис.9

Каждая антенна на приемнике получает сигнал не только предназначенный для нее (сплошные линии на рис.9), но и все сигналы, предназначенные другим антеннам (пунктирные линии). Если известна матрица передачи (например, в терминах h -параметров), то влияние сигналов, предназначенных для других антенн, можно вычислить и минимизировать.

Количество независимых потоков данных, которые могут одновременно передаваться, зависит от количества используемых антенн. Если количество передающих и приемных антенн одинаково, то количество независимых потоков данных равно или меньше количеству антенн. Например, в случае MIMO 4x4 количество независимых потоков данных может быть 4 (теоретический предел) или меньше. Если же количество передающих и приемных антенн не одинаково, то количество независимых потоков данных равно минимальному количеству

антенн (также теоретический предел) или меньше. Например, в случае ММО 4x2 количество независимых потоков данных может быть 2 или меньше.

Для вычисления максимальной пропускной способности в случае использования ММО применяется модифицируемая формула, аналогичная (8), но уже с учетом числа независимых потоков данных (M):

$$C = M \cdot P \cdot \log_2(1 + S/N). \quad (9)$$

Так, например, в начале августа 2017г. компания "МегаФон" объявила о запуске в коммерческую эксплуатацию сети Gigabit LTE по стандарту 5G с пиковой скоростью передачи данных 980 Мбит/с (на смартфоне Sony Xperia XZ Premium). Для достижения указанной скорости были использована агрегация 3-х несущих частот по 20 МГц: две по 20 МГц диапазона 2600 МГц и одна диапазона 1800 МГц. При этом использована модуляция 256QAM и технология 4x4 ММО. Интересно отметить, что в 2016г. на чемпионате мира по хоккею была достигнута пиковая скорость 450 Мбит/с по технологии 2x2 ММО.

Технология ММО нашла практическое применение в беспроводных локальных сетях стандарта IEEE 802.11n, а также в беспроводных сетях мобильной связи WiMAX и LTE.

Условия повышения качества приема. Не вдаваясь пока в теорию (это рассмотрено в других разделах), можем привести практические рекомендации по увеличению скорости передачи данных:

√ Приобретайте антенну только нужного вам частотного диапазона, исходя из функционального назначения;

√ Не экономьте на антенне. Именно исходное значение сигнал/шум (S/N) определяет качество связи и предельную скорость потока данных. Лучше сэкономить на кабеле, разъемах и репитере (как наиболее дорогом устройстве), но только не на антенне;

√ Перед покупкой оборудования воспользуйтесь первоначально бесплатной программой [Netmonitor](#) или [«Сотовые вышки»](#) и оцените реальный уровень сигнала, принимаемый вашим телефоном от Вашего провайдера. Если имеется возможность, то измерьте этой же программой уровень сигнала от других провайдеров (Би-Лайн, Мегафон, МТС, Ростелеком и др.) путем замены SIM-карты в вашем телефоне. При этом не меняйте сам телефон (планшет или смартфон)! Только SIM-карту! Попросите ее у вашего друга или соседа на 15-30 минут. Все данные запишите (если вы не понимаете, что там будет написано в процессе измерений) или (что лучше), сделайте скрин-шот непосредственно с телефона (с целью последующей отправки специалисту по электронной почте);

√ Выбирайте антенну с максимально возможным коэффициентом усилением для выбранного диапазона частот;

√ По-возможности, найдите оптимальную точку приема для вашей антенны (иногда смещение всего на 1 метр дает существенный энергетический выигрыш);

√ Помните, что всякие сторонние предметы (крыша, труба, стенка помещения и т.п.) искажают диаграмму направленности (ДН) вашей антенны. По-возможности, крепите антенну к мачте или к кронштейну, на расстоянии не менее 0,3-0,5 м от ближайших сторонних предметов;

√ Самая главная рекомендация – устанавливайте внешнюю антенну как можно выше! Именно высота подъема антенны играет решающую роль. С увеличением высоты установки антенны очень быстро нарастает напряженность электромагнитного поля. Это позволит вам не только добиться предельных скоростей передачи данных, но и снизить суммарные финансовые затраты при той же зоне покрытия.

√ Помните, что с увеличением коэффициента усиления антенны наблюдается сужение её ДН. Поэтому, не следует выбирать комнатную антенну с коэффициентом усиления более 12-14 дБи (см. формулу 2). Чем больше коэффициент усиления антенны, тем меньше зона её покрытия в боковых направлениях, но больше в прямом направлении. В каждом конкретном случае следует подходить индивидуально, с учетом топологического расположения комнат и желаемых областей покрытия.

√ Для увеличения площадей покрытия помещений, энергетически более выгодным (но не с точки зрения финансовых затрат) оказывается установка нескольких комнатных антенн, работающих при пониженных подводимых мощностях в сравнении с одной комнатной антенной, к которой подводится вся мощность, снимаемая с репитера.

√ Смело приобретайте антенны на 75 Ом с традиционным F-коннектором и используйте при этом кабель с [тройной радиозэкранной оплеткой](#). При этом вы не только снизите суммарные затраты, но и существенно повысите устойчивость СМС за счет высокого коэффициента радиозащиты.

√ При использовании антенны с высоким коэффициентом усиления (свыше 18 дБи), очень важна правильная ориентация антенны в направлении приема с БС выбранного оператора мобильной связи. Так, при $G_A=18$ дБи примерное значение ширина ДН антенны составит порядка 22 град. Физически это означает, что при ошибке ориентации всего на 11 град, эквивалентный коэффициент усиления антенны составит уже только 15 дБи, а такой важнейший параметр как S/N снизится на 3 дБ, что является очень существенной величиной, влияющей на скорость передачи данных.

Для примера в **табл.2** приведены основные параметры некоторых антенн СМС от компании DSR¹.

Базовым поставщиком всех этих антенн является НПК компания Крокс (г. Воронеж).

Научно-производственная фирма "Крокс" была создана в 2003 году, как результат усилий молодых инженеров, желающих применить свои знания и опыт конструирования в разработке и производстве сложных электронных устройств.

Сфера деятельности:

- Связная техника: синтезаторы частот, радиоканал приема-передачи, усилители мощности РЧ, цифровые модуляторы, измерители мощности.
- Антенные устройства: антенны рупорные, волноводно-щелевые, параболические, коллинеарные, панельные ФАР.
- Техника СВЧ: аттенюаторы, сумматоры и делители мощности СВЧ, переходы волновод-коаксиал, грозозащита.
- Охранные системы: датчики вибраций, система извещения через SMS (с использованием сотовых телефонов стандарта GSM) для квартир, дач и автомобилей, система слежения за автотранспортом на основе GPS. Контроллеры электронных ключей.

¹ Компания DSR является виртуальной группой компаний, в которую входят 7 самостоятельных компаний, работающих по своему направлению

Таблица 2. Основные эксплуатационные параметры некоторых типов антенн

Наименование параметра	AWP12 790/96	AWP20 1900/2200	AWP12 1700/1900	AWP20 2400/2700	AWP10 700/2700	AWN27 1700/2700M	AWP12 2300/2700M
Назначение	универс.	универс.	комнат.	внешняя	универс.	внешняя	универс.
Конструктив	панель	панель	панель	панель	штырь	сетка	панель
Крепление	к стене	к трубе	к стене	к трубе	метал. поверхность (магнит. основа)	к трубе	к трубе
Частотный диапазон, МГц	790-960	1900-2200	1700-1900	2400-2700	700-2700	1700-2700	2300-2700
Коэффициент усиления, дБи	12	20	12	20	10	27	12
Коэффициент возвратных потерь, дБ	<14	<1,6	<2,0	<1,5	<2,0	<1,5	<1,6
Импеданс, Ом	50/75	50/75	50/75	50/75	50/75	50	50/75
Коннекторы	F/N	F/N	F/N	F/N	F/N	SMA	F/N
Подводимая мощность, дБмВт	<40	<40	<40	<40	<40	<50	<50
Технология	стандарт	стандарт	стандарт	стандарт	стандарт	мимо	мимо
Кроссполяризационная развязка, дБ	-	-	-	-	-	>20	>25
Диапазон рабочих температур, °С	-40...+55	-40...+55	-40...+55	-40...+55	-40...+55	-40...+55	-40...+55
Сила ветра, м/с	<45	<30	<30	<30	<40	<25	<30
Габариты, мм	520x260x140	503x503x125	220x150x110	503x503x125	100x100x320	150x900x810	210x210x85