

С.Н. Песков, заместитель директора ГК «Полюс-С», к.т.н.  
 А.Е. Ищенко, генеральный директор ООО «ТехноСат»

# Определение дальности действия цифровой MMDS

## Часть 2. Реализуемая напряженность поля

В настоящей части статьи рассмотрены аналитические и графические способы определения дальности действия систем MMDS как классических цифровых линий связи. Первая часть была посвящена расчету требуемой напряженности поля, позволяющей без искажений принимать цифровые пакеты. Для удобства чтения здесь сохранена сквозная нумерации формул и рисунков первой части.

Напомним читателям, что первую часть (Т-С № 6, 2010. С. 52) мы закончили упрощенной формулой расчета минимальной напряженности поля, требуемой для чтения цифровых пакетов:

$$E_{\min} = 40 + C / N - G + C, \quad (18)$$

где: C/N – требуемое отношение несущая/шум, зависящее от вида используемого цифрового стандарта (DVB-C или DVB-T);

G – коэффициент усиления приемной антенны относительно полуволнового вибратора;

C – поправочный коэффициент, зависящий от вероятности приема и для типового значения в 50% C = 0 (см. таблицу 1).

Для большей иллюстративности и возможности самостоятельного проведения тех или иных сравнений приведем также расчетные соотношения общего вида, рекомендованные Женевской конференцией в июне 2006 года (формулы общего вида упрощены применительно к системам MMDS):

Входная шумовая мощность LNC:

$$P_n = F + 10 \lg(kT_A \Pi) = F - 136, \text{ дБВт.}$$

Полоса пропускания приемного канала П принята величиной в 8 МГц для DVB-C или DVB-T, а шумовая температура приемной MMDS антенны, как и в первой части, принята величиной 225 K°.

Минимальная входная мощность малошумящего конвертера (LNC):

$$P_{s \min} = C / N + P_n = C / N + F - 136, \text{ дБВт.}$$

Эффективная апертура антенны:

$$A_a = G + 10 \lg\left(\frac{1,64 \cdot \lambda^2}{4\pi}\right) = G + 40,7 + 20 \lg(f) = G - 27, \text{ дБ·м}^2;$$

где G – коэффициент усиления приемной антенны по отношению к полуволновому вибратору.

Минимальная плотность падающего потока мощности в точке приема:

$$\varphi_{\min} = P_{s \min} - A_a = C / N + F - G - 108,4, \text{ дБВт/м}^2.$$

Минимальная напряженность электрического поля:

$$E_{\min} = \varphi_{\min} + 120 + 10 \lg(120\pi) = \varphi_{\min} + 145,8 = C / N + F - G + 37,4, \text{ дБкВ/м.}$$

Требуемое значение напряженности поля:

$$E_{\text{треб}} = E_{\min} + C = C + C / N + F - G + 37,4, \text{ дБкВ/м,} \quad (19)$$

где C – тот же самый корректирующий вероятностный коэффициент, использующийся в формуле (18).

Обратим внимание на формулы (18) и (19), которые очень близки по своему написанию. При выводе упрощенной формулы (18) было принято, что коэффициент шума конвертера F = 2,5 дБ.

Для минимизации вычислений приведем табличные рекомендуемые расчетные значения C/N (таблица 2) для систем MMDS при трансляции цифровых сигналов по стандартам DVB-C и DVB-T.

Таблица 2

Формат модуляции	Загородные условия приема		Городские условия приема	
	DVB-C	DVB-T	DVB-C	DVB-T*
QPSK	10,5	4,9-9,9	17,8	8,1-13,8
16QAM	116,7	10,6-16,1	24,1	13,8-20,1
64QAM	22,9	16,2-22,3	30,3	19,4-26,3
256QAM	28,4	-	36,0	-

В последнее время все больше и больше уделяют внимание весьма перспективному стандарту DVB-T2, позволяющему реализовать весьма существенные скорости цифровых потоков при низких требуемых значениях C/N. Не вдаваясь в математическое описание, приведем только полезную таблицу по требуемым теоретическим значениям эксплуатационных параметров. Данный стандарт предусматривает очень большое число различных режимов работы. В силу этого представим только крайние (граничные) значения (min и max) эксплуатационных параметров (см. таблицу 3).

Таблица 3

Формат модуляции	Требуемое C/N, дБ			Скорость, Мбит/с min
	канал Гаусса	канал Райса	канал Рэлея	
QPSK	1,2-5,5	1,4-6,1	2,2-7,7	5,41-12,55
16QAM	6,0-11,7	6,4-12,3	7,6-14,9	10,78-25,16
64QAM	9,9-17,1	10,3-17,7	12,0-20,4	16,17-37,68
256QAM	13,2-22,3	13,7-22,8	15,8-25,8	21,56-50,35

Городские условия приема намного сложнее из-за наличия переотражений (интерференция волны при полном отсутствии всех защитных отношений, как это установлено DVB-T вещанием) и наличия многочисленных зон Френеля.

**Пример 2.** Определить требуемое значение напряженности поля для MMDS вещания в формате DVB-C при вероятности приема в 70% для городских условий приема с использованием формата модуляции 64QAM. Используется приемная антенна с коэффициентом усиления G = 24 дБ и LNC с коэффициентом шума 4,5 дБ.

**Решение.** Воспользуемся конечной формулой (19) для корректирующего коэффициента C = 2,9 дБ (см. таблицу 1):

\* В таблице 2 для DVB-T сигналов указана «вилка», т.к. значения зависят от используемого значения CR.

$$E_{\text{треб}} = E_{\text{мин}} + C = C + C / N + F - G + 37,4 = 2,9 + 30,3 + 4,5 - 24 + 37,4 = 51,1, \quad \text{дБмкВ/м.}$$

Именно такую напряженность поля должен формировать передатчик с выбранной передающей антенной. Еще раз акцентируем внимание читателя, что речь идет только о канальной, а не диапазонной мощности передатчика (что часто используется в групповых передатчиках).

**Графический способ расчета** подразумевает использование кривых распространения, по которым определяется напряженность в требуемой точке приема. На рис. 3 представлены кривые распространения для частоты 2,6 ГГц с вероятностью приема F(50/50) (кривые построены ГК «Полус-С» и пока приводятся как справочный материал, бездоказательно). Кривые распространения справедливы для равнинного ландшафта при эквивалентной излучаемой мощности передатчика в 1 кВт (0 дБкВт или 30 дБВт) и высоты подъема приемной антенны на 10 м.

**Пример 3.** Требуется спроектировать антенный пост системы MMDS, обеспечивающей радиус зоны покрытия в 30 км. Высота установки передающей антенны H = 50 метров. Использован питающий фидер (т.е. между передатчиком и передающей антенной) с погонными потерями 3,8 дБ/100 м на частоте 860 МГц. Вероятность приема – 70%. Использована равнинная ландшафтная местность. Высота установки приемной антенны h = 20 метров (городские условия приема с большими переотражениями). Коэффициент усиления приемной антенны G = 18 дБ. Коэффициент шума малошумящего конвертера F = 2,5 дБ (включая фидерные потери). Вещание должно вестись на частоте 2,65 ГГц. DVB-C сигналы транслируются в формате 64QAM.

**Решение.**

1. Пользуясь рис. 3, находим значение напряженности поля E для высоты подъема передающей антенны 75 м:

$$E = 41,6 \text{ дБмкВ/м.}$$

Такую напряженность поля обеспечивает передатчик с РЭИМ = 1 кВт на дальности 30 км.

2. Аналогично, пользуясь рис. 3, находим напряженность поля для высоты подъема передающей антенны 37,5 м:

$$E_{\text{мин}} = 34,0 \text{ дБмкВ/м.}$$

3. По формулам пересчета производим перерасчет напряженности поля для требуемой высоты в 50 м:

$$E = E_1 + (E_2 - E_1) \frac{\lg(H / H_1)}{\lg(H_2 / H_1)} = 34,0 + (41,6 - 34,0) \frac{\lg(50 / 37,5)}{\lg(75 / 37,5)} = 37,2 \text{ дБмкВ/м.}$$

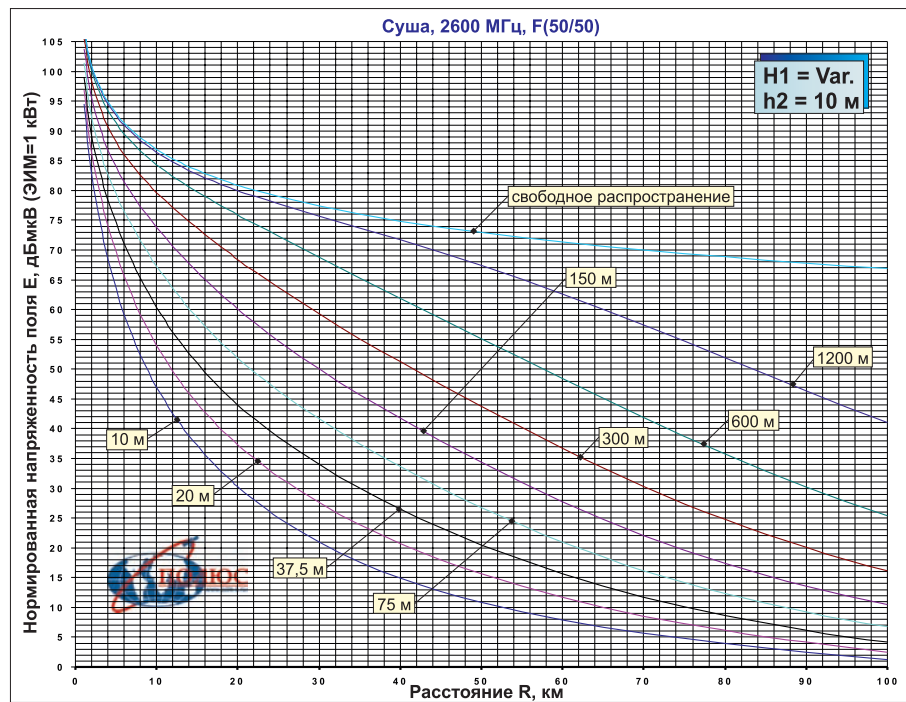


Рис. 3

Не зная формул пересчета, без большой погрешности можно пользоваться интерполяцией. Частотный перерасчет со справочной частоты 2,6 ГГц на рабочую частоту 2,65 ГГц можно вообще не проводить, так как изменения напряженности поля окажутся очень малыми.

4. Опять проводим перерасчет напряженности поля, но уже с учетом высоты подвеса приемной антенны, пользуясь формулами:

$$K_n = 3,2 + 6,2 \lg(f) = 3,2 + 6,2 \lg(2650) = 24,4; \\ C_E = K_n \cdot \lg(h_2 / 10) = 24,4 \cdot \lg(20 / 10) = 7,4 \text{ дБ.}$$

Физически это означает, что справочное значение E (при h = 10 м) увеличится на 7,4 дБ (при h2 = 20 м), то есть реализуемое значение E составит:

$$E = 37,2 \text{ дБмкВ/м} + 7,4 \text{ дБ} = 44,6 \text{ дБмкВ/м.}$$

Таким образом, подъем приемной антенны с 10 м (справочная величина, относительно которой приводятся кривые распространения) до 20 м снижает требования по напряженности поля сразу на 7,4 дБ, что является очень ощутимой величиной (требуется много меньшая мощность передатчика, или, что эквивалентно, увеличивается дальность приема при той же мощности).

5. Теперь можем перейти к определению требуемой напряженности поля, необходимой для нормального раскрытия DVB-C пакета, для чего воспользуемся формулой (19). При этом принимаем требуемое значение C/N = 30,3 дБ. Корректирующий фактор C (повышенная вероятность приема в 70%),

согласно таблице 1, приведенной в первой части статьи, составляет 2,9 дБ (напомним, что для вероятности приема в 50% C = 0). Таким образом, требуемое минимальное значение медианной напряженности поля составит:

$$E_{\text{треб}} = C + C / N + F - G + 37,4 = 2,9 + 30,3 + 2,5 - 18 + 37,4 = 55,1 \text{ дБмкВ/м.}$$

По упрощенной расчетной формуле (18) находим: E<sub>треб</sub> = 55,2 дБмкВ/м (практически то же самое значение).

6. Как видим, расхождение между требуемой (55,1 дБмкВ/м) и реализуемой (44,6 дБмкВ/м) напряженностью от РЭИМ = 30 дБВт составляет 10,5 дБ. Эта разница компенсируется или за счет увеличения мощности передатчика, или за счет использования передающей антенны с более высоким коэффициентом усиления. Для определенности примем, что использована эффективная передающая антенна MMDS с коэффициентом усиления в 20 дБ (усиление достигается за счет сужения диаграммы направленности антенны в вертикальной плоскости). Тогда требуемая мощность, подводимая к передатчику, определится из очевидного соотношения:

$$P_A = 30 + E_{\text{треб}} - E - G_A = 20,5 \text{ дБВт} (112,2 \text{ Вт}).$$

7. Таким образом, мы нашли требуемую канальную мощность передатчика (обращаем еще раз внимание на слово «канальную»), подводимую к передающей антенне. Однако на практике собственно передатчик

часто устанавливается в аппаратной студии на первом этаже. Это не является лучшим решением (передатчик желательнее устанавливать в непосредственной близости от передающей антенны), так как оно влечет за собой неизбежные потери в питающем подъемном фидере. Иногда в целях минимизации потерь используются и волноводы, что вполне оправданно. Для расчета потерь в питающем фидере воспользуемся известным соотношением:

$$a_{\phi} = a_0 \frac{L_{\phi}}{100} \cdot \sqrt{\frac{f}{f_c}} \quad (20)$$

Здесь:  $a_{\phi}$  – потери в питающем фидере;  $L_{\phi}$  – длина фидера (в нашем случае приравнена к высоте подъема передающей антенны);

$a_0$  – погонные потери фидера (по условиям примера 3,8 дБ/100 м на справочной частоте  $f_c = 860$  МГц).

Подставляя численные значения в формулу (20) получаем:  $a_{\phi} = 3,3$  дБ.

**8.** Рассчитываем требуемую выходную канальную мощность передатчика с учетом потерь в фидере. При этом принимаем, что не существует никаких дополнительных потерь в АФУ (в противном случае их необходимо суммировать с потерями самого фидера). Требуемая выходная канальная мощность передатчика MMDS составит:

$$P_{пер} = P_A + a_{\phi} = 20,5 + 3,3 = 23,8 \text{ дБВт (240 Вт)}.$$

Именно такая канальная мощность передатчика необходима для реализации зоны покрытия (ЗП) в 30 км с выбранными условиями передачи/приема. Отметим, что для вероятности приема в 50% (стандартное расчетное значение) потребуется канальная мощность передатчика уже величиной 123 Вт. А для приема в сельской местности достаточно будет мощности передатчика в 22 Вт. Как видим, мощность передатчика MMDS может варьироваться от 22 Вт до 240 Вт, то есть отличаться более чем в 10 раз (!), в зависимости от условий приема. Это свидетельствует о том, что при расчете ЗП всегда надо очень четко задавать условия приема.

Еще раз обращаем внимание читателей, что речь идет о канальной мощности передатчика. Если же выбирается групповой передатчик, то его мощность должна быть много больше. Она зависит также от справочных значений интермодуляционных искажений (CTB и CSO) и от числа транслируемых каналов. Тем не менее, можно привести упрощенную расчетную формулу по расчету требуемой мощности группового передатчика MMDS:

$$P_{групп} = P_{пер} + 10 \lg(N) + 1. \quad (21)$$

В формуле (21)  $N$  – число заявляемых каналов на групповой передатчик. Так, если на групповой передатчик заявлено 5 каналов, то его выходная мощность должна составлять 31,8 дБВт (1,5 кВт). Разумеется, что в ряде случаев необходимо учитывать и потери сумматора (если таковые имеются при синтезе обратной задачи).

Из приведенного примера видно, что на определение радиуса ЗП влияет множество факторов (в данном примере решалась обратная задача – нахождение требуемой мощности передатчика исходя из заданных условий приема). Например, если принять приемную антенну с коэффициентом усиления в 24 дБ, то потребуются канальная мощность передатчика в 4 раза меньшей (!), что очень значимо (5-50 Вт).

**Аналитический способ расчета** значительно менее трудоемок, позволяет «мгновенно» анализировать те или иные условия при постановке задачи, что очень удобно на практике. Как правило, расчетные формулы применительно к очень широкому диапазону частот (30-3000 МГц) дают некоторую погрешность (обычно не выше  $\pm 5$  дБ). Тем не менее, следует отметить, что и приведенный графический способ расчета также не идеален. Он тоже содержит в себе скрытые погрешности. Более того, следует заметить, что затухание волн в атмосфере (формула 2) в значительной степени зависит от погодных условий, времени суток и года. Большинство читателей неоднократно наблюдали это утверждение в своей практике. Так что видится, что использование аналитических способов расчета (но без громоздких пересчетных формул) вполне оправдано.

Наиболее удачной и универсальной является краткая, удобная и понятная формула С.Н. Пескова, которая впервые была опубликована в [2] и в последнее время все больше находит применение на практике:

$$E_{[дБмкВ]} = 64,5 + 20 \lg(Hh) - 40 \lg R - \sqrt{H/h} \cdot 10 \lg(1 + R/R_m) - 5 \lg f. \quad (22)$$

Например, для нашего расчетного случая  $E = 37,1$  дБмкВ/м для  $h = 10$  м и  $45,0$  дБмкВ/м для  $h = 20$  м. Для сравнения заметим, что при графическом способе расчета соответствующие значения составили 37,1 дБмкВ/м и 44,6 дБмкВ/м, то есть аналитические и графические расчетные значения практически совпадают.

Используя формулу (22), можно быстро проводить тот или иной анализ ситуации. Для примера оценим, как меняется радиус ЗП в зависимости от высоты подъема пере-

дающей антенны  $H$  при наличии реальных фидерных потерь, всегда неизбежных между выходом передатчика и питающим входом антенны.

Для простоты рассуждений будем полагать, что сам передатчик расположен у основания мачты, а длина фидерного кабеля  $L_{\phi}$  с погонными потерями  $\alpha_0$  [дБ/100м] на частоте  $f_c$  равна высоте подъема мачты, то есть  $L_{\phi} = H$ . В этом случае потери в фидере определяются по формуле (20). Результаты расчетов радиуса ЗП в зависимости от высоты подъема антенны  $H$  при разных погонных потерях питающего фидера представлены на рис. 4. Все кривые приведены для выходной мощности передатчика  $P = 1$  кВт и коэффициента усиления антенны  $G_a = 0$  дБ. Кривые, приведенные красным цветом, соответствуют нулевым фидерным потерям, то есть  $P = P_{ЭИМ} = 1$  кВт (30 дБВт).

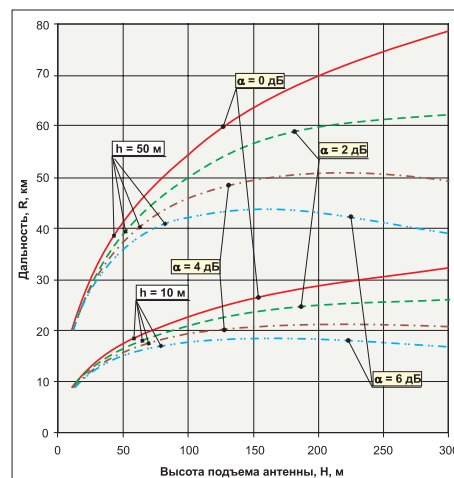


Рис. 4

Рассмотрение рис. 4 показывает, что наличие фидерных потерь снижает эффективность подъема передающей антенны  $H$ . Следует всячески минимизировать фидерные потери (включая потери в коннекторах, фильтрах, сумматорах и т.д.), использовать кабель с возможно меньшими погонными потерями и, по возможности, максимально приближать сам передатчик к передающей антенне или использовать волноводные линии передачи.

Эти рекомендации особенно важны для систем MMDS (с любым форматом модуляции) с учетом высокой частоты их вещания (как минимум, удвоенные погонные потери по отношению к 600 МГц).

Литература:

1. С.Н. Песков, А.Е. Ищенко. Определение дальности действия цифровой MMDS. Часть 1: Требуемая напряженность поля // «Теле-Спутник» № 6, 2010. С. 52.
2. С.Н. Песков. Дальность эфирного приема // «Теле-Спутник» № 10, 2009. С. 68.