

## Дальность эфирного приема

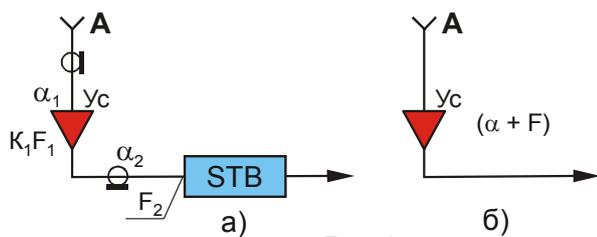
С.Н. Песков, зам. директора по науке ГК «Полюс-С», к.т.н.,  
А.Н. Подолянова, директор по маркетингу ГК «Полюс-С»

*В статье приводятся графические и аналитические методы расчета дальности приема аналоговых и цифровых сигналов при всех условиях приема как со стороны передатчика, так и со стороны приемника. Основное внимание уделено инженерным методам расчетов, пригодных для практического использования.*

На московских высших курсах повышения квалификации (МВКПК) одной из тем является определение дальности телевизионного приема для любых условий приема. Данная тема насыщена математическими формулами и сложна для восприятия слушателями. Профессионалы пытаются дать естественные практические советы: использовать антенну с максимально возможным коэффициентом усиления, установить малошумящий мачтовый усилитель и поднять антенну как можно выше. Без дополнительных условий или при отсутствии измерительного прибора дать более детальные ответы практически невозможно.

Цель настоящей статьи – дать исчерпывающую информацию по определению качества приема при минимально возможном математическом аппарате. Надеемся, что статья будет доступной для чтения широкому кругу читателей.

**Коэффициент шума приемной системы.** Приемную систему в общем случае можно



представить (см. рис.1) из приемной антенны (А), соединительного кабеля с потерями  $\alpha_1$  на рассматриваемой частоте  $f_1$ , мачтового (или антенного) усилителя (УС), с коэффициентом шума  $F_1$  и коэффициентом усиления  $K$ , кабеля снижения с потерями  $\alpha_2$  и собственно STB (или телевизора) с коэффициентом шума  $F_2$ .

Коэффициент шума приемной системы

определяется известной формулой Фриза:

$$F / \alpha_1 = F_1 + \frac{F_2 - 1}{K \alpha_2}. \quad (1)$$

При проведении всех дальнейших рассуждений сделаем одно очевидное допущение, много упрощающее все последующие расчеты:

$$F_1 \gg \frac{F_2 - 1}{K \alpha_2}, \quad (2)$$

или, представляя в логарифмическом виде:

$$F_1 - F_2 + K - \alpha_2 \geq 10 \text{ dB} \quad (3)$$

Физически это означает, что вклад шумов STB в шумовую мощность приемной системы много меньше (на порядок или 10 dB) вклада шумов мачтового (или антенного) усилителя. На практике это действительно так. Именно с этой целью и устанавливается малошумящий мачтовый усилитель.

Приняв справедливое допущение (2) можем считать, что коэффициент шума приемной системы (т.е. с выхода приемной антенны или со входа соединительного кабеля) с учетом потерь в соединительном кабеле  $\alpha_1$  записывается в виде:

$$F_{[dB]} = F_{1[dB]} + \alpha_{1[dB]}. \quad (4)$$

Очевидно, что при использовании мачтового усилителя  $\alpha_1 = 0$  и  $F = F_1$ .

**Мощность шумов приемной системы** складывается из тепловой шумовой мощности приемной системы и шумовой мощности приемной антенны:

$$P_{ш} = kT_o\Pi(A-1) + kT_A\Pi, \quad (5)$$

где:  $k = 1,38 \cdot 10^{-23}$  Вт/°С·Гц - постоянная Больцмана;

$T_o = 293$ °К – нормальная температура;

$\Pi$  – полоса пропускания видеоканала (например, 4,75 МГц для PAL, 5,75 МГц для SECAM и 7,61 МГц для DVB-T).

Шумовая температура антенны  $T_o$  (в основном обязана галактическим и атмосферным шумам) довольно точно аппроксимируется выражением, полученным С.Н.Песковым еще в 1995г.:

$$T_A = \frac{T_o}{2} \left[ \left( \frac{500}{f} \right)^2 + 1,5 \right]. \quad (6)$$

Зная входную мощность (или напряжение) на выходе приемной антенны, можно найти отношение сигнал/шум (S/N) или несущая/шум (C/N):

$$C/N = \frac{P_A}{P_{ш}} = \frac{U_A}{U_{ш}} \quad (7)$$

или в логарифмическом виде:

$$C/N_{[dB]} = U_{A[dB\mu V]} - U_{ш[dB\mu V]} \quad (8)$$

Если вспомнить, что шумовая температура усилителя (приемной системы) выражается зависимостью

$$T = T_o(F-1), \quad (9)$$

то формулу (5) для шумовой мощности можно записать в виде:

$$P_{ш} = k\Pi(T_A + T). \quad (10)$$

Пользуясь математическими преобразованиями, на основании определения (7) с учетом (10), можно записать выражение для C/N в логарифмической форме через шумовое напряжение:

$$C/N = U_A - 10\lg(T_A + T) + 22,3 + 10\lg\left(\frac{\Pi}{5,75}\right). \quad (11)$$

Выражение (11) очень удобно для практического использования. Пользуясь (11) удобно составить справочную таблицу для определения минимально допустимого уровня сигнала на выходе антенны при требуемом C/N. Результаты расчетов для C/N = 54 dB представлены в табл.1. Соответствующие графики приведены на рис.2.

**Таблица 1. Требуемое выходное напряжение антенны (C/N = 54 dB)**

f, МГц	F=0 dB	F=2 dB	F=6 dB	F=10 dB	F=16 dB	F=20 dB
50	73,5	73,5	73,7	74,2	75,9	78,2
100	67,6	67,8	68,5	69,9	73,6	76,9
200	62,3	62,9	64,8	67,5	72,7	76,5
300	59,7	60,8	63,5	66,9	72,5	76,5
400	58,3	59,7	63,0	66,6	72,5	76,4

f, МГц	F=0 dB	F=2 dB	F=6 dB	F=10 dB	F=16 dB	F=20 dB
500	57,4	59,1	62,7	66,5	72,4	76,4
600	56,8	58,7	62,5	66,5	72,4	76,4
700	56,4	58,4	62,4	66,4	72,4	76,4
800	56,2	58,3	62,4	66,4	72,4	76,4
900	56,0	58,1	62,3	66,4	72,4	76,4

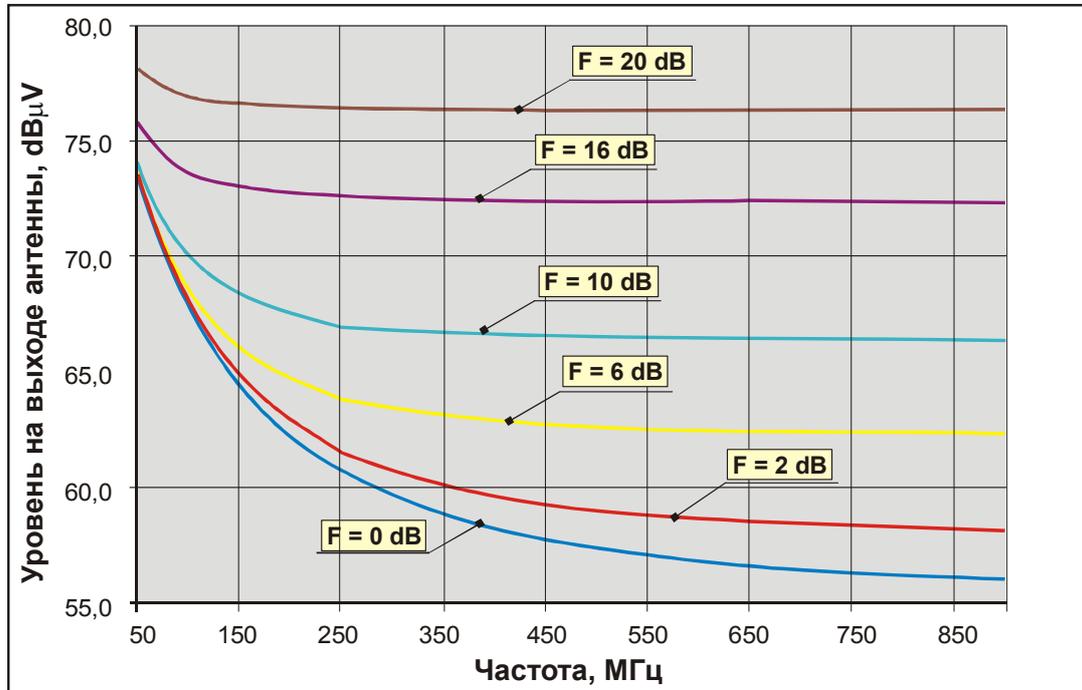


Рис.2

**Пример 1.** Требуется найти минимально допустимый уровень сигнала на выходе антенны для приема к.53 (727,25 МГц) системы SECAM ( $\Pi = 5,75$  МГц) с  $C/N = 42$  dB (хорошее качество для индивидуального приема) при использовании мачтового усилителя с коэффициентом шума 2,5 dB. Потери в соединительном кабеле 0,4 dB.

**Решение.**

1 Суммарный коэффициент шума приемной системы составит:

$$F = F_{yc} + \alpha = 2,5 + 0,4 = 2,9 \text{ dB}$$

2 Пользуясь справочными значениями табл.1 и кривыми, представленными на рис.2, находят требуемое антенное напряжение:  $U_A \approx 59$  dB $\mu$ V. Вычитаем из этого значения разницу между нормированным ( $C/N = 54$  dB) и требуемым ( $C/N = 42$  dB) значениями:

$$U_A \geq 59 - (54 - 42) = 47 \text{ dB}\mu\text{V}.$$

3 Данное решение можно найти и алгебраически, воспользовавшись формулами (6), (9) и (11):

$$T_A = 289 \text{ }^\circ\text{C}; \quad F = 10^{(2,5+0,4)/10} = 1,95; \quad T = 278,3 \text{ K}^\circ;$$

$$U_A \geq C/N + 10\lg(T_A + T) - 22,3 - 10\lg(\Pi/5,75) = \quad (12)$$

$$42 + 10\lg(289 + 278,3) - 22,3 - 10\lg(5,75/5,75) = 47,2 \text{ dB}\mu\text{V}.$$

**Напряженность электрического поля.** Зная коэффициент усиления приемной антенны –  $K_{np}$ , через ее требуемое выходное напряжение  $U_A$  легко рассчитать и требуемую напряженность электрического поля  $E$ :

$$E_{[dB\mu V]} = U_A - K_{np} - 33,6 + 20\lg(f) \quad (13)$$

Расчетные значения напряженности поля  $E$  при  $K_{np} = 0$  и различных значениях коэффициента шума приемной системы  $F$  представлены в табл.2 и на рис.3. Напряжение полезного сигнала, развиваемого на выходе антенны по физическому смыслу должно превышать шумовое напряжение приемной системы, определяемой с учетом шумовой температуры антенны  $T_A$  по формуле:

$$U_A \geq C/N + F - K_{np} - 10\lg(f) + 31,2 \quad (14)$$

**Таблица 2. Требуемое значение напряженности поля ( $C/N = 54$  dB,  $K_{np} = 0$  dB)**

f, МГц	F=0 dB	F=2 dB	F=6 dB	F=10 dB	F=16 dB	F=20 dB
50	73,9	73,9	74,1	74,6	76,3	78,6
100	74,1	74,3	74,9	76,3	80,0	83,3
200	74,7	75,4	77,2	80,0	85,2	89,0
300	75,7	76,7	79,5	82,9	88,5	92,4
400	76,7	78,1	81,4	85,1	90,9	94,9
500	77,8	79,5	83,1	86,9	92,8	96,8
600	78,8	80,7	84,5	88,4	94,4	98,4
700	79,8	81,8	85,7	89,7	95,7	99,7
800	80,7	82,7	86,8	90,9	96,9	100,9
900	81,5	83,7	87,8	91,9	97,9	101,9

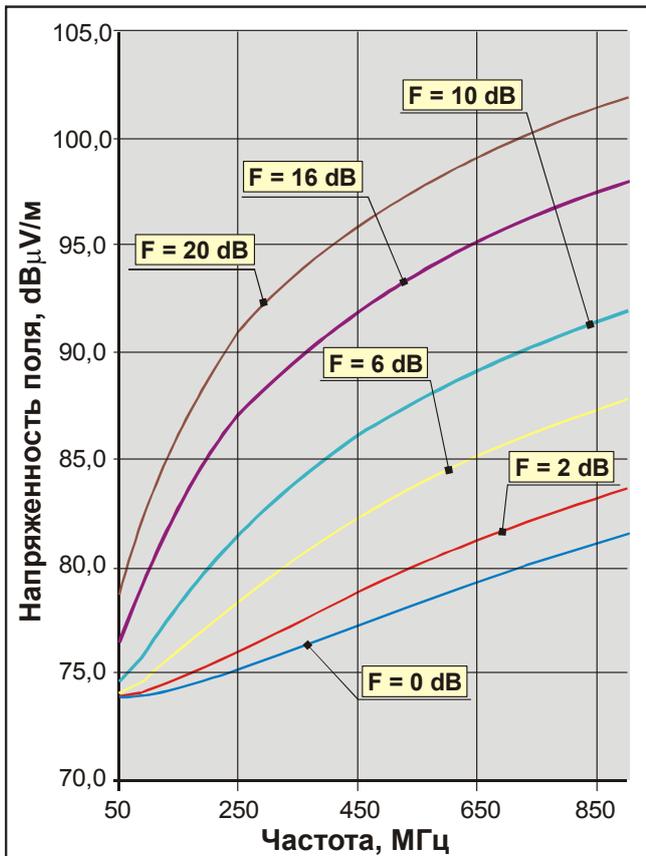


Рис.3

Подставив (14) в (13), получим важное приближенное выражение по расчету минимально допустимой напряженности поля в удобном аналитическом виде:

$$E_{\text{треб}} = C/N + F - K_{np} + 10\lg(f) - 2,9. \quad (15)$$

Приближенность уравнения (15) заключается в частотной аппроксимации шумовой температуры антенны линейной зависимостью.

**Пример 2.** Рассчитать минимально допустимую напряженность поля  $E_{\text{треб}}$  для  $C/N = 54$  dB,  $F = 2$  dB и  $K_{np} = 0$  dB на частоте 600 МГц.

**Решение:** Подставляем заданные численные значения в формулу (15):

$$E_{\text{треб}} = 54 + 2 - 0 + 10\lg(600) - 2,9 = 80,9 \text{ dB}\mu\text{V/m}$$

Как видим, разница с точным табличным значением (см. табл.2) составляет всего 0,2 dB.

**Основное уравнение дальности** в удобном алгебраическом виде было впервые введено С.Н. Песковым в [1] на базе [2] и записывается в виде:

$$E_{[dB\mu V]} = 64,4 + P_{nep} + G_{nep} - 51\lg(f) - 40\lg(R) + 20\lg(Hh) - \sqrt{\frac{H}{h}} \cdot 10\lg\left(1 + \frac{R}{R_M}\right), \quad (16)$$

где:  $R_M = 4,12(\sqrt{H} + \sqrt{h})$  - уравнение радиовидимости;

$H$  – высота подъема передающей антенны, м;

$h$  – высота подвеса приемной антенны, м;

$R$  – расстояние от вещательного центра до точки приема, км;

$P_{nep}$  – мощность передатчика (мощность, подводимая к антенне), dBkW;

$G_{nep}$  – коэффициент усиления передающей антенны.

Обозначим часть уравнения (16), независящую от свойств вещательного центра, через коэффициент  $A$ :

$$A = 20\lg(Hh) - 40\lg(R) - \sqrt{\frac{H}{h}} \cdot 10\lg\left(1 + \frac{R}{R_M}\right) \quad (17)$$

и логично потребуем, чтобы реализуемая напряженность поля (16) была больше минимально допустимой (требуемой) напряженности поля (15), т.е. выполнения условия  $E_{реал} \geq E_{треб}$ , которое после преобразования можно записать в виде:

$$A > C / N + F - K_{np} + 15\lg(f) - 66,8 - P_{nep} - G_{nep}. \quad (18)$$

Зависимости введенного коэффициента  $A$  от  $R$  и  $H$  при стандартном фиксированном значении  $h = 10$  м представлены в табл.3 и на рис.4.

**Таблица 3. Коэффициент “А” для  $h = 10$  м**

R,км	H=35м	H=70м	H=100м	H=150м	H=200м	H=300м	H=500м
5	21,90	27,79	30,83	34,29	36,75	40,21	44,59
10	8,96	14,71	17,68	21,06	23,47	26,88	31,19
20	-4,64	0,82	3,65	6,87	9,18	12,44	16,59
30	-12,99	-7,81	-5,13	-2,07	0,11	3,22	7,19
40	-19,11	-14,2	-11,67	-8,78	-6,71	-3,77	0,00
50	-23,97	-19,32	-16,93	-14,21	-12,26	-9,48	-5,93
60	-28,02	-23,61	-21,36	-18,79	-16,97	-14,36	-11,01
70	-31,49	-27,31	-25,19	-22,78	-21,07	-18,63	-15,49
80	-34,54	-30,57	-28,57	-26,32	-24,72	-22,44	-19,52
90	-37,25	-33,48	-31,6	-29,5	-28,01	-25,89	-23,18
100	-39,69	-36,12	-34,35	-32,39	-31,00	-29,05	-26,54

Для удобства проведения расчетов удобно ввести коэффициент  $B$ :

$$B = C / N + F - K_{np}. \quad (19)$$

Кроме того, введем поправочный коэффициент  $C$ :

$$C = 25\lg\left(\frac{h}{10}\right), \quad (20)$$

учитывающий реальную высоту подвеса приемной антенны. С учетом принятых обозначений, основное неравенство (18) перепишем в конечном виде:

$$A > B + 15 \lg(f) - 66,8 - P_{\text{ЭИИМ}} + 25 \lg\left(\frac{h}{10}\right). \quad (21)$$

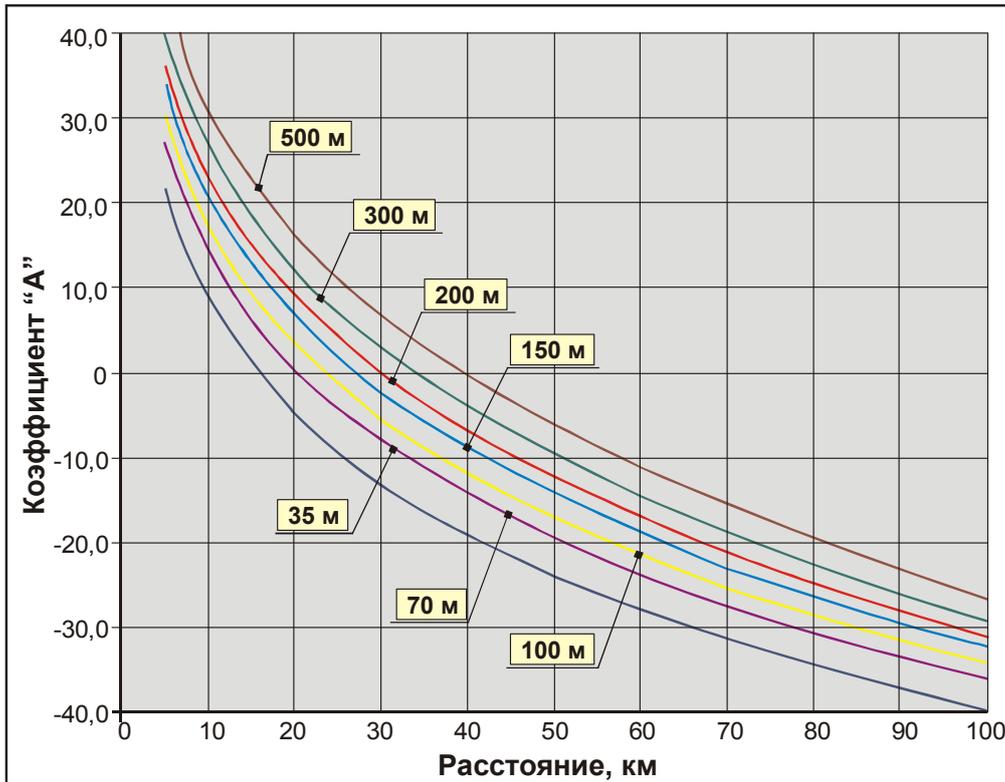


Рис.4

Приведем численные примеры пользования формулой (21).

**Пример 3.** Требуется определить возможность приема TV сигналов диапазона МВШ (174-230 МГц) на антенну с коэффициентом усиления 6 dB в сочетании с антенным усилителем с коэффициентом шума 6 dB. Антенный усилитель установлен в непосредственной близости от телевизора (дача). Длина кабеля снижения класса RG-59 с погонными потерями  $\alpha_0 = 26$  dB/100 м на частоте 862 МГц составляет  $l = 20$  метров. Высота установки антенны – 8 метров. Известно, что мощности передатчиков в диапазоне МВШ составляют по 5 кВт каждый. Коэффициент усиления передающих антенн, установленных на высоте 375 м, составляет 2,5 dB. Дача расположена в удалении от телевизора на 45 км.

**Решение.**

1. Потери кабеля снижения в верхней точке рассматриваемого частотного диапазона  $f_e$  составят:

$$\alpha = \frac{\alpha_0 \cdot l}{100} \sqrt{\frac{f_e}{f_0}} = \frac{26 \cdot 20}{100} \sqrt{\frac{230}{862}} = 2,7 \text{ dB}$$

2. По графикам рис.3 и табл.3 (или по формуле 17) находим коэффициент  $A$ :

$$A = 5,2$$

3. Из уравнения (21) рассчитываем максимально возможный коэффициент  $B$ :

$$\begin{aligned} B &\leq A - 15 \lg(f) + 66,8 + P_{\text{ЭИИМ}} + 25 \lg\left(\frac{h}{10}\right) = \\ &= -5,2 - 15 \lg(174) + 66,8 + 10 \lg(5) + 2,5 + 25 \lg(8/10) = 35,1 \text{ dB}. \end{aligned}$$

4. Из выражения (19) находим реализуемое значение  $C/N$ :

$$C/N = B + K_{np} - F - \alpha = 35,1 + 6 - 6 - 2,7 = 32,4 \text{ dB}$$

Расчеты показывают, что качество приема будет очень плохим (срывы цветности, шумы, а периодически – и срыв синхронизации). Если же установить мачтовый усилитель (вместо антенного) с коэффициентом шума в 2,5 dB и использовать приемную антенну с повышенным коэффициентом усиления в 12 dB, то реализуемое значение  $C/N$  уже составит 44,4 dB, что соответствует отличным условиям приема.

Альтернативным вариантом является поднятие антенны до высоты в 15 м. В этом случае реализуемое значение  $C/N$  составит 42,6 dB, что также соответствует отличным условиям приема.

**Пример 4.** Требуется априорно определить минимально допустимую высоту подвеса антенны  $h$  для приема DVB-T цифрового пакета ПО к.37 (590-598 МГц). Высота установки передающей антенны  $H = 225$  м. Мощность передатчика  $P_{nep} = 0,5$  кВт при коэффициенте усиления антенны 4,2 dB. Дальность приема составляет 80 км.

**Решение.**

1. В целях установки максимально комфортных условий приема, используем мачтовый маломощный усилитель АА113 (“Телемак”, Россия) с коэффициентом шума  $F \leq 0,8$  dB и синфазную антенную решетку с коэффициентом усиления  $K_{np} \approx 21$  dB, выполненную на антеннах S29/S21-62 (“Микроника”, Россия).

2. Задаемся минимально допустимым  $C/N_{mpeб}$  для канала приема Райса ( $C/N \geq 23,7$  dB для 64QAM, CR = 7/8) с технологическим запасом в 3,7 dB (всепогодные условия приема) и поправочным коэффициентом на полосу пропускания канала (7,61 МГц вместо 5,75 МГц для аналогового вещания):

$$C/N_{mpeб} = C/N + 3,7 + 10 \lg(\Pi/5,75) = 23,7 + 3,7 + 10 \lg(7,61/5,75) = 28,6 \text{ dB}$$

3. По графикам рис.4, табл.3 или формуле (17) находим коэффициент  $A$ :

$$A = -30,4$$

4. Пользуясь уравнением (16), составляет граничное уравнение:

$$25 \lg\left(\frac{h}{10}\right) \geq C/N_{mpeб} + F - K_{np} - A + 15l(f) - 66,8 + P_{nep} + G_{nep} =$$

$$28,6 + 0,8 - 21 + 30,4 + 15 \lg(594) - 66,8 + 10 \lg(0,5) + 4,2 = 14,8$$

откуда:

$$h \geq 10 \cdot 10^{14,8/25} = 39,1 \text{ м}$$

Такую высоту подъема антенны можно обеспечить, установив ее на мачте 12-ти этажного дома. Данный пример наглядно показывает преимущества DVB-T вещания в сравнении с аналоговым вещанием. В дополнение к примеру скажем, что если использовать типовой мачтовый усилитель с коэффициентом шума 3,5 dB и диапазону антенну ДМВ с коэффициентом усиления 12 dB, то на прежней высоте подъема 39,1 м можно обеспечить дальность порядка 63 км. А при аналоговом вещании с  $C/N = 54$  dB – около 34 км.

Таким образом, получено основное уравнение, связывающее реализуемое значение  $C/N$  со всеми условиями приема и передачи через коэффициент  $A$ , увязывающей высоты, установки передающей и приемной антенн с дальностью приема:

$$C/N = A + 66,8 + P_{nep} + G_{nep} + K_{np} - F - 15 \lg(f) + 25 \lg\left(\frac{h}{10}\right). \quad (22)$$

Авторы с удовольствием ответят на все вопросы и критические замечания по E-mail: dmarket@pole-s.ru.

### **Литература**

1. Песков С.Н. Аналитические методы расчета напряженности поля, создаваемой передатчиком. “Телеспутник”, 2008г., №10, с.94-97.
2. Песков С.Н., Подолянова А.Н. Расчет напряженности поля, создаваемой передатчиком. Часть 1. Кривые распространения. “Телеспутник”, 2008г., №8, с.80-83.

Октябрь 2009г.