



Департамент космических служб

РАСЧЕТ ВЕРОЯТНОСТИ ВРЕДНЫХ ПОМЕХ
МЕЖДУ КОСМИЧЕСКИМИ СЕТЯМИ
(ОТНОШЕНИЯ C/I)

1 Введение

Администрация, которая не может успешно завершить координацию, может просить Бюро рассмотреть вероятность вредных помех согласно положению п. 11.32А. В случаях, когда координация согласно п. 9.7 не может быть успешно завершена, Бюро для оценки вероятности вредных помех пользуется методом, основанным на отношении несущей к единичной помехе (C/I)¹, который описан в Разделе В3 Части В Правил процедуры.

В этом методе расчет отношения C/I осуществляется в соответствии с геометрическим подходом, приведенным в Рекомендации МСЭ-R S.740, и используется коэффициент отстройки от помех, отражающий величину мощности помех, которая должна учитываться при расчете. Далее, скорректированное значение C/I сравнивается с требуемым значением C/I для оценки вероятности вредных помех. Требуемое значение C/I получается из желаемого отношения C/N и значения K , которое для цифровых несущих, как правило, равно 12,2 дБ (или 14 дБ в некоторых других случаях). Оно соответствует максимально допустимой помехе, составляющей, соответственно, 6% (или 4%) от общей мощности шума.

Метод расчета отношения C/I для единичной помехи также широко используется администрациями для оценки помех при координации спутниковых сетей.

2 Отношение несущая/шум (C/N)

В бюджете линии учитываются коэффициенты усиления и потери сигнала при его распространении из одного конца линии в другой. Он используется при проектировании линий связи и учитывает показатели линии, такие как тип услуг, заданные зоны обслуживания, скорости передачи, готовность линии и требования к размерам антенн, в числе прочих факторов. Поэтому при представлении заявок на регистрацию спутниковой сети в Бюро, содержащиеся в них данные обычно выводятся из бюджетов линии с желаемыми показателями линии, которые обеспечивают желаемое отношение несущая/шум (C/N), что является мерой качества работы линии.

¹ ВКР-15 приняла Резолюцию 762, в которой критерии плотности потока мощности заменяют метод C/I для некоторых случаев, о которых говорится в Резолюции.

2.1 Расчет отношения C/N

На приведенной ниже диаграмме изображена типовая спутниковая линия связи, состоящая из одной линии вверх и одной линии вниз, а также параметры, которые требуются для расчета отношения C/N.

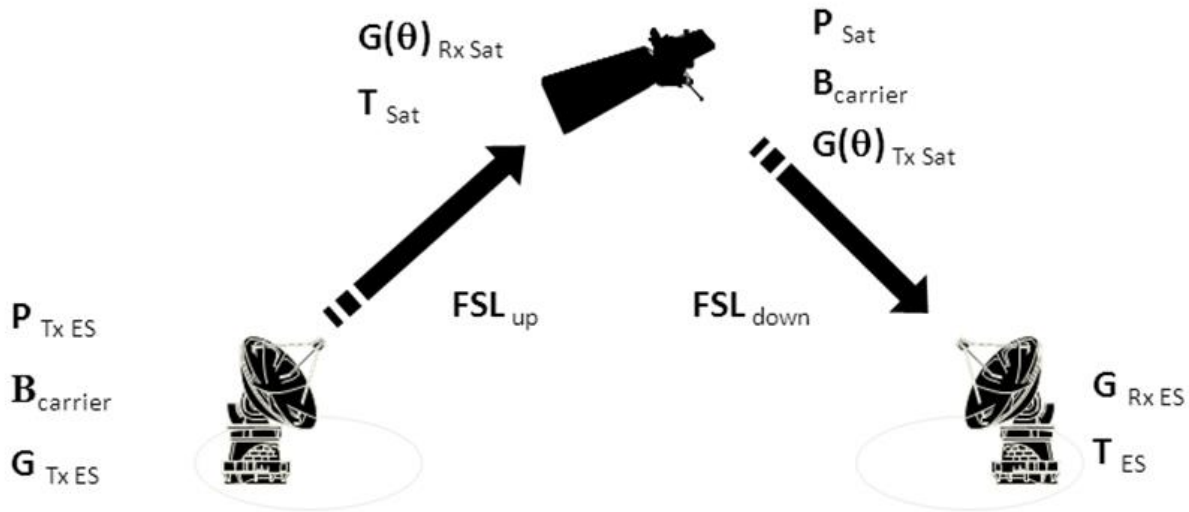


Рисунок 1 – Спутниковая линия связи

Формула для расчета отношения несущая/шум (C/N) выражается следующим образом:

$$(C/N)_{up} = EIRP_{Tx ES} - FSL_{up} + (G(\theta)/T)_{RxSat} - B_{carrier} - k \quad (\text{дБ}) \quad [1]$$

$$(C/N)_{up} = P_{Tx ES} + G_{Tx ES} - FSL_{up} + G(\theta)_{RxSat} - (T_{Sat} + B_{carrier} + k) \quad (\text{дБ}), \quad [2]$$

где:

$$C_{up} = P_{Tx ES} + G_{Tx ES} - FSL_{up} + G(\theta)_{RxSat} \quad (\text{дБВт}); \quad [3]$$

$P_{Tx ES}$ = мощность передающей земной станции (дБВт);

$G_{Tx ES}$ = коэффициент усиления передающей земной станции (дБи);

FSL_{up} = потери в свободном пространстве на линии вверх (дБ);

$G(\theta)_{RxSat}$ = коэффициент усиления приемной антенны спутника в направлении передающей земной станции (дБ);

T_{RxSat} = шумовая температура приемной системы спутника (дБК);

$B_{carrier}$ = ширина полосы несущей (дБГц);

k = постоянная Больцмана = -228,6 (дБДж/К).

$$(C/N)_{down} = EIRP_{sat} - FSL_{down} + (G/T)_{RxES} - B_{carrier} - k \quad (\text{дБВт}) \quad [4]$$

$$(C/N)_{down} = P_{Sat} + G(\theta)_{TxSat} - FSL_{down} + G_{RxES} - (T_{ES} + B_{carrier} + k) \quad (\text{дБВт}), \quad [5]$$

где:

$$C_{down} = P_{Sat} + G(\theta)_{TxSat} - FSL_{down} + G_{RxES}; \quad [6]$$

P_{Sat} = мощность передающего устройства спутника (дБВт);

$G(\theta)_{TxSat}$ = коэффициент усиления передающей антенны спутника в направлении приемной земной станции (дБи);

FSL_{down} = потери в свободном пространстве на линии вниз (дБ) (см. формулу [7]);

G_{RxES} = коэффициент усиления приемной антенны земной станции (дБи);

T_{ES} = шумовая температура приемной земной станции (дБК);

B_{carrier} = ширина полосы несущей (дБГц);
 k = постоянная Больцмана = $-228,6$ (дБДж/К).

2.2 Потери передачи в свободном пространстве

Потери передачи в свободном пространстве (FSL) – это потери мощности в результате расходимости сигнала в пространстве, которые могут быть получены следующим образом:

$$\text{FSL} = 20(\log f + \log d) + 32,45 \quad (\text{дБ}), \quad [7]$$

где:

f : частота (МГц);
 d : расстояние (км).

Расстояние d между земной станцией и геостационарным спутником задается формулой:

$$d = 42\,644 \sqrt{1 - 0,2954 \cos \psi} \quad \text{км}, \quad [8]$$

где:

$$\cos \psi = \cos \zeta \times \cos \beta, \quad [9]$$

где:

ζ : широта земной станции;
 β : разность долгот спутника и земной станции.

ПРИМЕЧАНИЕ. – Если $\cos \psi < 0,151$, то спутник находится под плоскостью горизонта.

Расстояние d_s между двумя геостационарными спутниками определяется следующим образом (применимо при расчете FSL для сигнала, проходящего от одного геостационарного спутника к другому):

$$d_s = 84\,332 \sin \frac{\theta_g}{2} \quad \text{км}, \quad [10]$$

где:

θ_g : геоцентрический угловой разнос.

3 Расчет отношений несущая/помеха

3.1 Отношение C/I на линии вверх

На приведенной ниже диаграмме изображен сценарий помех на линии вверх, при котором земная станция, осуществляющая связь со спутником, создает помехи соседнему спутнику.

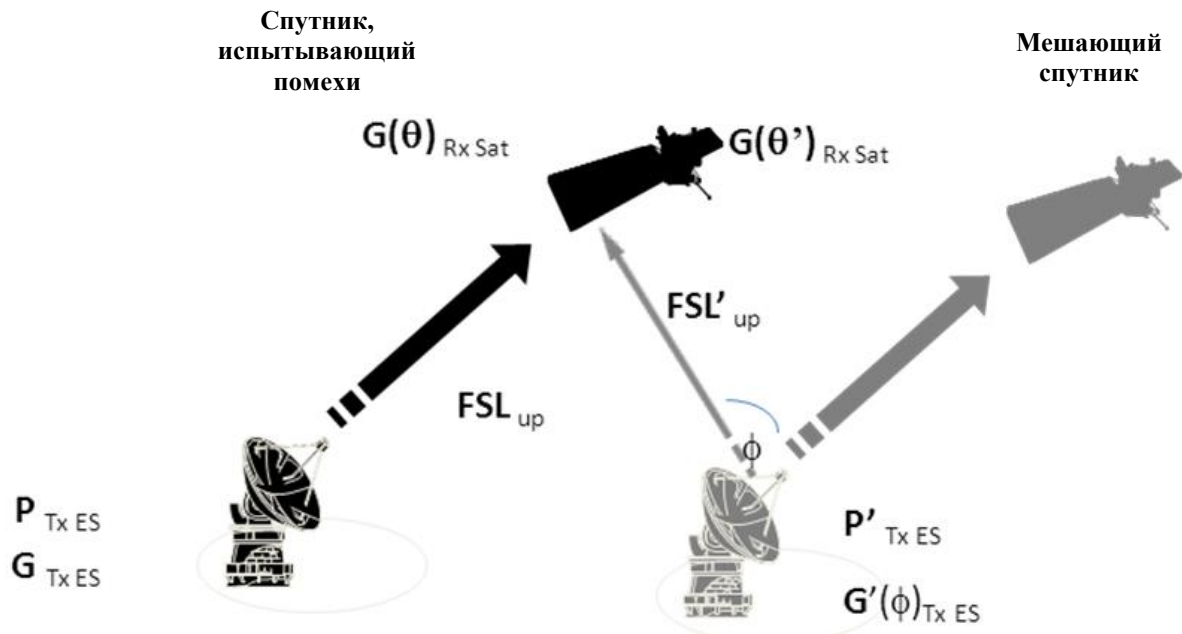


Рисунок 2 – Сценарий помех на линии вверх

Отношение несущая/помеха (C/I) на линии вверх определяется следующим образом:

Согласно формуле [3]

$$\begin{aligned} C_{up} &= P_{Tx ES} + G_{Tx ES} - FSL_{up} + G(\theta)_{Rx Sat} \\ I_{up} &= P'_{Tx ES} + G'(\phi)_{Tx ES} - FSL'_{up} + G(\theta')_{Rx Sat}, \end{aligned} \quad [11]$$

где:

$P'_{Tx ES}$ = мощность мешающей передающей земной станции;

$G'(\phi)_{Tx ES}$ = коэффициент усиления бокового лепестка мешающей передающей земной станции в направлении космической станции, испытывающей помехи,

а

ϕ = топоцентрический угловой разнос между спутником, испытывающим помехи, и мешающим спутником относительно мешающей передающей земной станции;

FSL'_{up} = потери в свободном пространстве мешающей передающей земной станции;

$G(\theta')_{Rx Sat}$ = коэффициент усиления приемной антенны космической станции, испытывающей помехи, в направлении мешающей земной станции.

Следовательно,

$$(C/I)_{up} = (P_{Tx ES} + G_{Tx ES} - FSL_{up} + G(\theta)_{Rx Sat}) - (P'_{Tx ES} + G'(\phi)_{Tx ES} - FSL'_{up} + G(\theta')_{Rx Sat}). \quad [12]$$

3.2 Отношение C/I на линии вниз

На приведенной ниже диаграмме изображен сценарий помех на линии вниз, при котором спутник, осуществляющий связь с земной станцией, создает помехи приемной земной станции соседнего спутника.

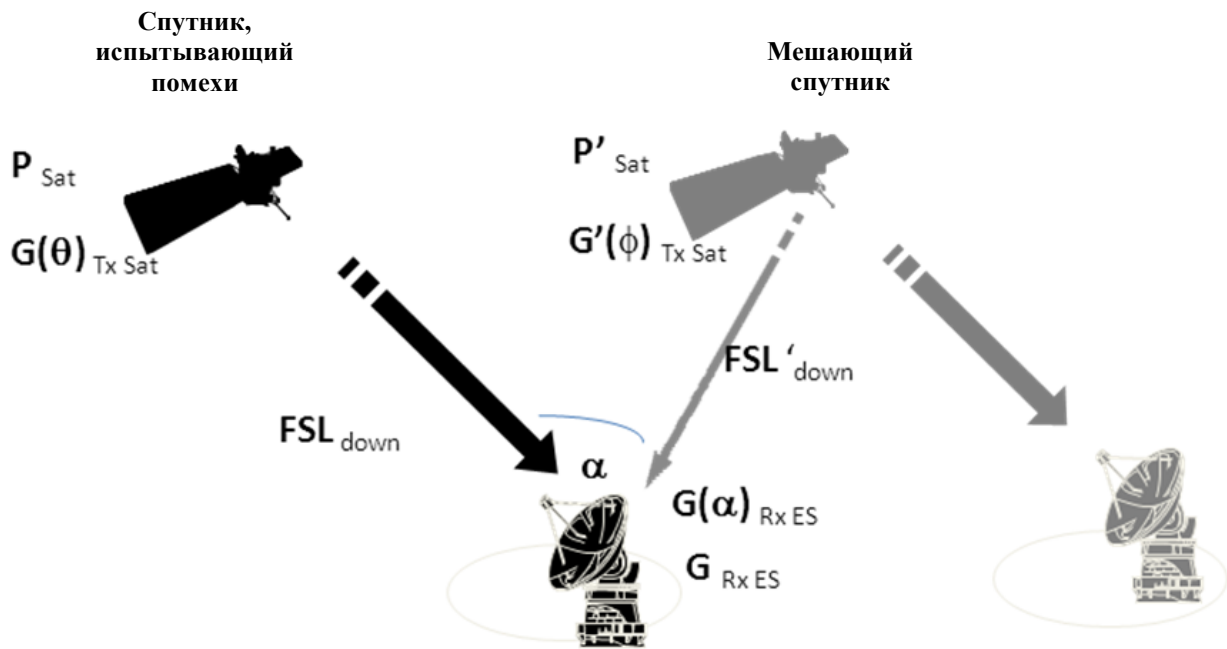


Рисунок 3 – Сценарий помех на линии вниз

Отношение несущая/помеха (C/I) на линии вниз определяется следующим образом:

Согласно формуле [6]

$$\begin{aligned} C_{\text{down}} &= P_{\text{Sat}} + G(\theta)_{\text{Tx Sat}} - FSL_{\text{down}} + G_{\text{Rx ES}} \\ I_{\text{down}} &= P'_{\text{Sat}} + G'(\phi)_{\text{Tx Sat}} - FSL'_{\text{down}} + G(\alpha)_{\text{Rx ES}}, \end{aligned} \quad [13]$$

где:

- P'_{Sat} = мощность мешающего передающего спутника;
- $G'(\phi)_{\text{Tx Sat}}$ = коэффициент усиления передающей антенны мешающего спутника в направлении земной станции, испытывающей помехи;
- FSL'_{down} = потери в свободном пространстве мешающего передающего спутника;
- $G(\alpha)_{\text{Rx ES}}$ = коэффициент усиления бокового лепестка земной станции, испытывающей помехи, в направлении мешающего спутника,

где:

- α = топоцентрический угловой разнос между спутником, испытывающим помехи, и мешающим спутником относительно приемной земной станции, испытывающей помехи.

Следовательно,

$$(C/I)_{\text{down}} = (P_{\text{Sat}} + G(\theta)_{\text{Tx Sat}} - FSL_{\text{down}} + G_{\text{Rx ES}}) - (P'_{\text{Sat}} + G'(\phi)_{\text{Tx Sat}} - FSL'_{\text{down}} + G(\alpha)_{\text{Rx ES}}). \quad [14]$$

3.3 Топоцентрический угловой разнос

Угловой разнос, образуемый двумя геостационарными спутниками относительно земной станции, называется топоцентрическим угловым разномом, θ_t , который можно определить по следующей формуле:

$$\theta_t = \arccos \left(\frac{d_1^2 + d_2^2 - \left(84\,332 \sin \frac{\theta_g}{2} \right)^2}{2d_1 \cdot d_2} \right), \quad [15]$$

где:

d_1 и d_2 = расстояния в км от земной станции до обоих спутников, соответственно (см. формулу 8);

θ_g = геоцентрический угловой разнос в градусах между двумя спутниками с учетом допусков на удержание спутника по долготе.

3.4 Диаграммы направленности антенн

Несмотря на то что боковое излучение антенн является нежелательным, его нельзя устранить. Излучение антенны характеризуется главным лепестком, боковыми лепестками и некоторыми переходными областями между этими двумя видами лепестков. Существует несколько эталонных кривых для огибающей излучения, которые моделируют маску диаграммы направленности излучения антенны. В качестве примера ниже приводится эталонная диаграмма, соответствующая Приложению 8 к Регламенту радиосвязи:

a) для значений $\frac{D}{\lambda} \geq 100$ (максимальное усиление $\geq$ приблизительно 48 дБ):

$$\begin{aligned} G(\varphi) &= G_{max} - 2,5 \times 10^{-3} \left(\frac{D}{\lambda} \varphi \right)^2 && \text{при } 0 < \varphi < \varphi_m \\ G(\varphi) &= G_1 && \text{при } \varphi_m \leq \varphi < \varphi_r \\ G(\varphi) &= 32 - 25 \log \varphi && \text{при } \varphi_r \leq \varphi < 48^\circ \\ G(\varphi) &= -10 && \text{при } 48^\circ \leq \varphi \leq 180^\circ, \end{aligned}$$

где:

$\left. \begin{array}{l} D: \text{ диаметр антенны} \\ \lambda: \text{ длина антенны} \end{array} \right\}$ выраженные в одной и той же единице;

φ : угол в градусах, отсчитываемых от оси антенны;

G_1 : усиление первого бокового лепестка $= 2 + 15 \log \frac{D}{\lambda}$.

(В тех случаях, когда $\frac{D}{\lambda}$ не задано, его можно определить по формуле $20 \log \frac{D}{\lambda} \approx G_{max} - 7,7$,

где G_{max} – усиление основного лепестка антенны (дБ).)

$$\varphi_m = \frac{20 \lambda}{D} \sqrt{G_{max} - G_1} \quad \text{градусов}$$

$$\varphi_r = 15,85 \left(\frac{D}{\lambda} \right)^{-0,6} \quad \text{градусов}$$

b) для значений $\frac{D}{\lambda} < 100^4$ (максимальное усиление $<$ приблизительно 48 дБ):

$$\begin{aligned} G(\varphi) &= G_{max} - 2,5 \times 10^{-3} \left(\frac{D}{\lambda} \varphi \right)^2 && \text{при } 0 < \varphi < \varphi_m \\ G(\varphi) &= G_1 && \text{при } \varphi_m \leq \varphi < 100 \frac{\lambda}{D} \\ G(\varphi) &= 52 - 10 \log \frac{D}{\lambda} - 25 \log \varphi && \text{при } 100 \frac{\lambda}{D} \leq \varphi < 48^\circ \\ G(\varphi) &= 10 - 10 \log \frac{D}{\lambda} && \text{при } 48^\circ \leq \varphi \leq 180^\circ. \end{aligned}$$

Другие эталонные диаграммы направленности антенн представлены в следующих справочных документах:

- Дополнение 3 к Приложению 7 к Регламенту радиосвязи;
- Рекомендация МСЭ-R S.465-6;
- Рекомендация МСЭ-R S.580-6;
- Рекомендация МСЭ-R S.1855-0;
- Рекомендация МСЭ-R M.694-1;
- Рекомендация МСЭ-R VO.1213-1;
- Рекомендация МСЭ-R VO.1295;
- Рекомендация МСЭ-R VO.1900;
- Рекомендация МСЭ-R VO.2063-0.

4 Коэффициент отстройки от помех

Величину мощности мешающей несущей, которая должна учитываться в полезной несущей, можно получить с использованием отношения ширины полосы полезной несущей к ширине полосы мешающей несущей. Это отношение называется коэффициентом отстройки от помех. Как следует из его названия, рассчитываемые по формулам [12] и [14] значения C/I корректируются с помощью коэффициента отстройки от помех для учета величины мощности мешающей несущей.

В случае помех от шумоподобных цифровых несущих, если ширина полосы полезной несущей меньше ширины полосы мешающей несущей, то при расчете C/I учитывается только часть мощности мешающей несущей. И наоборот, если ширина полосы полезной несущей больше ширины полосы мешающей несущей, то учитывается влияние нескольких мешающих несущих, затрагивающих одну полезную несущую.

В случае мешающих аналоговых несущих, если энергетический спектр мешающего сигнала неизвестен, то расчет помех можно выполнить, приняв спектральную плотность мощности мешающей несущей постоянной по всей ширине полосы полезной несущей. Эквивалентную ширину полосы (BW_{eqi}) можно вычислить следующим образом:

$$BW_{eqi} = \text{Общая пиковая мощность} / \text{максимальная плотность мощности}.$$

В ситуации с помехами на несовпадающих частотах, испытываемыми несущей ТВ-ЧМ от другой несущей ТВ-ЧМ, используются маски защитного отношения, которые определены в Правилах процедуры, относящихся к § 3.5.1 и § 3.8 Дополнения 5 к Приложению 30.

Эти три метода учета мощности помех можно в обобщенном виде представить в следующей таблице:

ТАБЛИЦА 1
Случаи применения коэффициента отстройки от помех

Полезная несущая Мешающая несущая	Цифровая	Аналоговая (отличная от ТВ-ЧМ)	Другая	ТВ-ЧМ
Цифровая	МЕТОД 1: Корректировка с использованием отношения перекрытия ширины полосы (ШП) полезной несущей и ШП мешающей несущей			
ТВ-ЧМ	МЕТОД 2: Корректировка с использованием отношения перекрытия ШП полезной несущей и эквивалентной ШП мешающей несущей			МЕТОД 1: Совпадающие частоты
Аналоговая (отличная от ТВ-ЧМ)				МЕТОД 3: Несовпадающие частоты (Относительное защитное отношение)
Другая				МЕТОД 2

5 Определение требуемого C/I

Критерий защиты от единичной помехи для цифровой несущей и нетелевизионной аналоговой несущей представлен желаемым отношением C/N и значением k , равным либо 12,2, либо 14 дБ, которое можно в обобщенном виде представить следующим образом:

Тип полезной несущей \ Тип мешающей несущей	Цифровая	Аналоговая (отличная от ТВ-ЧМ)
Аналоговая (ТВ-ЧМ)	$C/N + 14$ (дБ)	
Цифровая	$C/N + 12,2$ (дБ)	
Аналоговая (отличная от ТВ-ЧМ)	$C/N + 12,2$ (дБ)	
Другая	$C/N + 14$ (дБ)	

В случае если мешающая несущая относится к типу аналоговой ТВ-ЧМ несущей или другой несущей, отличной от цифровой и нетелевизионной ЧМ, критерии защиты можно в обобщенном виде представить следующим образом:

Тип мешающей несущей / Тип полезной несущей	Аналоговая (ТВ-ЧМ) или другая
Аналоговая (ТВ-ЧМ)	$C/N + 14$ (дБ)
Цифровая	Если $BW_w \leq BW_{eqi}$, то $C/N + 5,5 + 3,5 \cdot \log(BW_w)$ (дБ)
	В противном случае, если $BW_w > BW_{eqi}$, то $C/N + 12,2$ (дБ)
Аналоговая (отличная от ТВ-ЧМ)	$11,4 + 2 \cdot \log(BW_w)$ (дБ)
Другая	$11,4 + 2 \cdot \log(BW_w)$ (дБ)

где:

BW_w : необходимая ширина полосы полезной несущей (МГц);

BW_{eqi} : эквивалентная ширина полосы мешающей несущей (МГц);

C/N : отношение несущая/шум (дБ).

В разделе В3 Части В Правил процедуры типы несущих разбиты по группам на основе класса излучения (элемент С.7.а Дополнения 2 к Приложению 4):

- Аналоговая (ТВ-ЧМ):
Когда в определении класса излучения (элемент С.7.а Дополнения 2 к Приложению 4) первым символом является "F", а третьим – "F" или "W".
- Аналоговая (отличная от ТВ-ЧМ):
Когда в определении класса излучения первым символом является "F", а третьим – любой, кроме "F" и "W".
- Цифровая:
Когда первым символом в классе излучения является "G".
- Другая:
Когда первым символом в классе излучения является любой символ, кроме "F" и "G".

6 Дополнительный запас

В Таблице 2 Рекомендации МСЭ-R S.741-2 отношение " C/N " определяется как "отношение (дБ) мощности несущей к общей мощности шума, которая включает все внутренние шумы системы и помехи от других систем".

Таким образом, чтобы обеспечить соответствие данному определению, к запасам, рассчитанным на основе представленных администрациями значений внутренних шумов системы, добавляется дополнительный запас 0,46 дБ в случаях, включающих полезные аналоговые ТВ излучения, и 1,87 дБ в случаях других полезных излучений, за исключением случаев, когда представленное желаемое значение C/N уже включает запас для учета межсистемных помех. Эти запасы определены в Присоединении 2 раздела В3 Правил процедуры.

7 Выбор местоположения, соответствующего наихудшему случаю

Для получения наихудшего значения C/I местоположения земной станции могут выбираться следующим образом:

Линия вверх

Полезная земная станция расположена на краю зоны обслуживания полезного приемного луча. Мешающая земная станция расположена в пределах зоны обслуживания мешающего приемного луча в точке, в которой достигается максимальное усиление полезного приемного луча.

Линия вниз

Полезная земная станция расположена на краю зоны обслуживания полезного передающего луча в точке, в которой достигается максимальное усиление мешающего передающего луча.

8 Допущения для упрощения расчетов

Поскольку разница между значениями топоцентрического и геоцентрического углов мала, можно получить достаточно точный результат расчета C/I с использованием геоцентрических углов вместо топоцентрических. Кроме того, разница между потерями в свободном пространстве для сигналов, распространяющихся по различным трассам, но совместно использующих одинаковые полосы частот, невелика. При этих допущениях, формулы [12] и [14] для расчета C/I можно упростить следующим образом:

Согласно формуле [12]

$$(C/I)_{up} = (P_{TxES} + G_{TxES} - FSL_{up} + G(\theta)_{RxSat}) - (P'_{TxES} + G'(\phi)_{TxES} - FSL'_{up} + G(\theta')_{RxSat})$$

Заменив ϕ на ϕ_g и приняв $FSL_{up} = FSL'_{up}$, получим:

$$(C/I)_{up} = (P_{TxES} + G_{TxES} - FSL_{up} + G(\theta)_{RxSat}) - (P'_{TxES} + G'(\phi_g)_{TxES} - FSL'_{up} + G(\theta')_{RxSat})$$

$$(C/I)_{up} = (P_{TxES} + G_{TxES} + G(\theta)_{RxSat}) - (P'_{TxES} + G'(\phi_g)_{TxES} + G(\theta')_{RxSat}),$$

где:

ϕ_g = геоцентрический угловой разнос между спутником, испытывающим помехи, и мешающим спутником относительно мешающей передающей земной станции.

Аналогичным образом, на линии вниз можно получить достаточно точный результат расчета C/I с использованием следующей формулы:

$$(C/I)_{down} = (P_{Sat} + G(\theta)_{TxSat} + G_{RxES}) - (P'_{Sat} + G'(\phi)_{TxSat} + G(\alpha_g)_{RxES}), \quad [14]$$

где:

α_g = геоцентрический угловой разнос между спутником, испытывающим помехи, и мешающим спутником относительно приемной земной станции, испытывающей помехи.