

3. *Острейковский В. А.* Прогнозирование техногенного риска динамических систем методами катастроф: [Текст] / В. А. Острейковский, С. П. Саакян, Л. В. Силин // *Фундаментальные исследования*. — Пенза: Академия естествознания, 2012. — № 3. — Ч. 2.

4. *Poston T.* Catastrophe Theory and Its Applications / T. Poston, I. Stewart. // *Dover Books on Mathematics*. — N. Y.: Dover Publications, 2012. — 512 p.

5. *Thom R.* Structural Stability and Morphogenesis: An Outline of a General Theory of Models / R. Thom. — 2nd ed. — Boston: Addison-Wesley, 1989.

УДК 621.396.946.2

А. А. Ильин,

зав. кафедрой радиосвязи на морском флоте,
канд. техн. наук, профессор,
ГУМРФ имени адмирала С. О. Макарова

К РАСЧЕТУ ПАРАМЕТРОВ СПУТНИКОВЫХ РАДИОЛИНИЙ ДЛЯ СВЯЗИ С НЕФТЕДОБЫВАЮЩЕЙ ПЛАТФОРМОЙ

PARAMETERS CALCULATIONS OF SATELLITE RADIO LINKS FOR COMMUNICATIONS WITH THE OIL-EXTRACTING PLATFORM

В статье рассматривается обобщенный алгоритм расчета основных параметров широкополосных (Broadband) спутниковых пользовательских радиолоний. Для упрощения понимания сути расчетов алгоритм разделен на четыре блока. В примерах используются данные о спутнике Inmarsat-4 и терминале класса 3 системы Inmarsat BGAN. Методику предлагается использовать в инженерных расчетах, курсовом и дипломном проектировании.

In article the generalized algorithm for calculation of key parameters of broadband satellite user radio links is considered. For understanding simplification the algorithm is shared into four parts. For examples the specifications of the Inmarsat-4 satellite and Class 3 Inmarsat BGAN terminal are used. The technique is offered to be used in engineering calculations, course and degree design.

Ключевые слова: угол места и азимут, топоцентрическое расстояние, наклонная дальность, эффективная изотропная излучаемая мощность, подводимая к антенне мощность, потери на свободное пространство, дополнительные потери, добротность и эквивалентная шумовая температура, скорость и эффективность кадра передачи.

Key words: elevation angle and azimuth, topocentric distance, inclined distance, the effective isotropic radiated power, free space losses, additional losses, the quality and equivalent noise temperature, binary rate and efficiency of the frame.



ЛЯ спутниковой связи с нефтедобывающими платформами широко применяются терминалы класса 3 широкополосной (Broadband) системы Inmarsat BGAN и доступ в Internet/Intranet через ИСЗ Inmarsat-4 [1; 2].

Исходные данные. Допустим, что нефтедобывающая платформа, помещенная в Северном море (61°17'2" N, 0°14'31" W), будет использовать службу BGAN Inmarsat, чтобы получить доступ к ее корпоративной сети через соединение с виртуальной частной сетью (Virtual Private Network — VPN), следуя схеме, изображенной на рис. 1. Спутник Inmarsat-4 F2 (ЕМЕА, орбита GEO 25° E) предоставляет на нисходящей линии эффективную изотропную излучаемую мощность: $EIRP_d = 67$ дБВт, а станция спутникового доступа (SAS) находится в Buzum (53°16'55" N,

6°12'47" E), Нидерланды. Соединение между спутником и нефтедобывающей платформой реализуется в L -диапазоне на частотах 1525–1559 МГц для нисходящей линии и 1626,5–1660,5 МГц для восходящей линии. На нефтедобывающей платформе размещен терминал Explorer 110, чтобы устанавливать связь через спутник. Этот терминал работает с четырьмя несущими частотами и при «мультинесущем» способе требует для передачи снижения уровня выходного сигнала (Back-Off) 3 дБ. Коэффициент усиления антенны терминала, как на прием, так и на передачу, равен $G = 8,5$ дБ. На восходящей линии для соединения «нефтедобывающая платформа–спутник» система Inmarsat BGAN требует при передаче эффективную изотропную излучаемую мощность на одну несущую частоту: $EIRP_{a,car} = 10$ дБ·Вт.

Высота орбиты геостационарного спутника: $H = 35\,786$ км над поверхностью Земли (земной радиус — $R = 6370$ км).

В нижеследующих вычислениях используем центральные частоты каждого диапазона.

Дополнительные потери (ошибка наведения, потери из-за деполяризации и т. д.): $L = 15$ дБ

Обобщенный алгоритм расчета состоит из четырех блоков:

1. Вычислим угол места ϵ и азимут A , с которыми нужно ориентировать антенну терминала нефтедобывающей платформы на спутник, и дистанцию D до спутника Inmarsat-4 [3].

Подспутниковая точка S' :

— широта 0° : $\varphi_s = 0^\circ$;

— долгота 25° E: $\lambda_s = 25^\circ$.

Нефтедобывающая платформа:

— широта $61^\circ 17' 2''$ N: $\varphi_m = 61,28^\circ$;

— долгота $0^\circ 14' 31''$ W: $\lambda_m = -0,24^\circ$.

Относительная долгота, то есть разность долготы подспутниковой точки S' и наблюдателя λ_m : $\Delta\lambda = |\lambda_s - \lambda_m| = 25,24^\circ$.

СХЕМА ДОСТУПА ТЕРМИНАЛА НЕФТЕДОБЫВАЮЩЕЙ ПЛАТФОРМЫ К СЕТИ Internet ЧЕРЕЗ ИСЗ Inmarsat-4

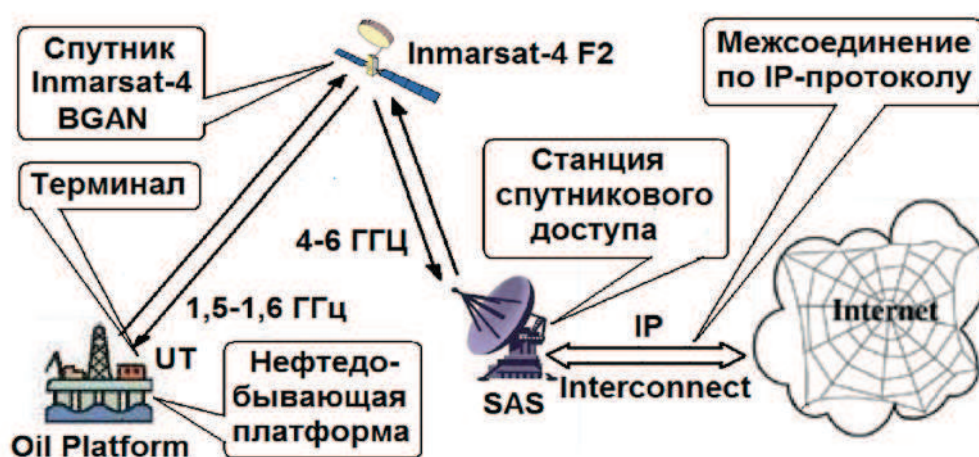


Рис. 1. Схема доступа терминала нефтедобывающей платформы к Сети

Дистанция D , известная как наклонная дальность, вычисляется по формуле

$$D = [R^2 + (R + H)^2 - 2 \cdot R \cdot (R + H) \cdot \cos(\rho)]^{0.5} = [6370^2 + (6370 + 35\,786)^2 - 2 \cdot 6370 \cdot 42\,156 \cdot 0,434654]^{0.5} = (40\,619\,056 + 1\,777\,128\,336 - 233438511,06576)^{0.5} = (1\,584\,308\,881)^{0.5} = 39803,38 \text{ км.} \quad (1)$$

Косинус топоцентрического расстояния $\cos(\rho)$ для геостационарного спутника вычисляется по формуле

$$\cos(\rho) = \cos(\varphi_m) \cdot \cos(\Delta\lambda) = \cos(61,28^\circ) \cdot \cos(25,24^\circ) = 0,480530 \cdot 0,904529 = 0,434654. \quad (2)$$

Топоцентрическое расстояние ρ определяем из выражения

$$\rho = \arccos [\cos(\varphi_m) \cdot \cos(\Delta\lambda)] = \arccos 0,434654 = 1,1211 \text{ рад} = 64,237^\circ. \quad (3)$$

Угол места ε вычисляется по следующим формулам:

$$\begin{aligned} \operatorname{tg} \varepsilon &= \operatorname{ctg} \rho - (R \cdot \operatorname{cosec} \rho) / (R + H) = \operatorname{ctg} 64,1284^\circ - 6370 \cdot (\operatorname{cosec} 64,237^\circ) / 42156 = \\ &= 0,482622 - (6370 \cdot 1,110371) / 42156 = 0,484961 - 0,167783 = 0,317178; \end{aligned} \quad (4)$$

$$\varepsilon = \operatorname{arctg} 0,317178 = 0,3072 \text{ рад} = 17,598^\circ. \quad (5)$$

Азимут A вычисляется по формулам:

$$\begin{aligned} \sin A &= \cos \varphi_s \cdot \sin \Delta\lambda \cdot \operatorname{cosec} \rho = \cos 0^\circ \cdot \sin 25,24^\circ \cdot \operatorname{cosec} 64,237^\circ = \\ &= 1 \cdot 0,426411 \cdot 1,110371 = 0,473474; \end{aligned} \quad (6)$$

$$A = \operatorname{arcsin} 0,473474 = 0,4932 \text{ рад} = 28,261^\circ. \quad (7)$$

Однако ввиду того, что нефтедобывающая платформа находится к западу от подспутниковой точки S' , мы должны брать северо-восточный NE квадрант, поэтому искомый азимут вычисляется по формуле

$$A_{NE} = 180 - A = 180 - 28,261^\circ = 151,739^\circ. \quad (8)$$

2. Вычислим необходимую эффективную изотропную излучаемую мощность $EIRP_a$ [дБ·Вт] терминала Explorer 110 с нефтедобывающей платформы, которая насыщает транспондер спутника Inmarsat-4, и мощность P_t [Вт], которую должен выдавать усилитель НРА терминала в антенну.

Число несущих n_{car} определяется из выражения

$$n_{car} = 10^{[(EIRP_a + IBO)/10]} / 10^{(EIRP_{a,car}/10)}, \text{ шт.}, \quad (9)$$

где $\wedge$ — операция возвышения в степень, $EIRP_a$ — эффективная изотропная излучаемая антенной мощность, дБ·Вт; IBO — потери мощности ретранслятора при приеме сигналов от нескольких несущих (Input Back-Off – IBO), дБ; $EIRP_{a,car}$ — эффективная изотропная излучаемая антенной мощность, приходящаяся на одну на несущую, дБ·Вт.

Из выражения (9) следует формула

$$EIRP_a = 10 \cdot \log(n_{car}) + EIRP_{a,car} - IBO, \text{ дБ·Вт}. \quad (10)$$

Если:

— число несущих: $n_{car} = 4$;

— эффективная изотропная излучаемая мощность на несущую: $EIRP_{a,car} = 10$ дБ·Вт;

— потери мощности ретранслятора при приеме сигналов от нескольких несущих (Input Back-Off — IBO): $IBO = -3$ дБ,

то

$$EIRP_a = 10 \cdot \log(4) + 10 - (-3) = 6,02 + 10 + 3 = 19,02 \text{ дБ·Вт}. \quad (11)$$

Итак, эффективная изотропная излучаемая мощность терминала, которая насыщает транспондер спутника Inmarsat-4, равна $EIRP_a = 19,02$ дБ·Вт.

По определению, эквивалентная изотропная излучаемая мощность $EIRP_a$ [дБ·Вт] связана с подводимой к антенне мощностью P_t [дБ·Вт] и коэффициентом усиления передающей антенны G_t [дБ] выражением

$$EIRP_a [\text{дБ·Вт}] = P_t [\text{дБ·Вт}] + G_t [\text{дБ}]. \quad (12)$$

Декларируемый коэффициент усиления антенны терминала Explorer 110 на передачу: $G_t = 8,5$ дБ. Мощность P_t [дБ·Вт], которую должен выдавать усилитель в антенну, полагая, что практически нет потерь в питающем антенну фидере:

$$P_t [\text{дБ}\cdot\text{Вт}] = \text{EIRP}_a [\text{дБ}\cdot\text{Вт}] - G_t [\text{дБ}] = 19,02 - 8,5 = 10,52 \text{ дБ}\cdot\text{Вт}. \quad (13)$$

Мощность, подводимая к антенне усилителем терминала Explorer 110, равна

$$P_t [\text{Вт}] = 10^{\{P_t [\text{дБ}\cdot\text{Вт}]/10\}} = 10^{10,52/10} = 10^{1,052} = 11,27 \text{ Вт}, \quad (14)$$

где $\wedge$ — операция возвышения в степень.

3. Для нисходящей линии «спутник–нефтедобывающая платформа» специфицируется отношение сигнал/шум: $C/\text{No} = 73,7$ дБ. Вычислим необходимое отношение G_r/T_r [дБ/°К] и эквивалентную температуру шума в терминале Explorer 110:

$$(C/\text{No}) = \text{EIRP}_d - L_\Sigma + G_r/T_r - 10 \cdot \log k \quad (15)$$

Значение эффективной изотропной излучаемой со спутника Inmarsat–4 мощности EIRP_d специфицировано (смотри исходные данные):

$$\text{EIRP}_d = 67 \text{ дБ}\cdot\text{Вт} = 67 + 30 = 97 \text{ дБм}. \quad (16)$$

Вычислим потери на распространение сигнала в свободном пространстве:

$$L_{sp} [\text{дБ}] = 92,45 + 20 \cdot \log 1,542 [\text{ГГц}] + 20 \cdot \log 39803,38 [\text{км}] = 92,45 + 3,76 + 91,99 = 188,2 \text{ дБ}. \quad (17)$$

Имея в виду дополнительные потери $L = 15$ дБ, получаем полные потери L_Σ в нисходящей линии:

$$L_\Sigma = L_{sp} + L = 188,2 + 15 = 203,2 \text{ дБ}. \quad (18)$$

Добротность приемной системы G_r/T_r [дБ/°К] терминала Explorer 110 (см. формулу (15)):

$$G_r/T_r [\text{дБ}/^\circ\text{К}] = 73,7 - 67 + 203,2 - 228,6 = -18,7 \text{ дБ}/^\circ\text{К}. \quad (19)$$

Так как для терминала Explorer 110 на приеме усиление антенны $G_r = 8,5$ дБ, то эквивалентная шумовая температура T_r [дБ/°К] терминала Explorer 110 вычисляется по формуле

$$T_r [\text{дБ}\cdot^\circ\text{К}] = G_r [\text{дБ}] - G_r/T_r [\text{дБ}/^\circ\text{К}] = 8,5 + 18,7 = 27,2 \text{ дБ}\cdot^\circ\text{К}. \quad (20)$$

Потенцируя (20), получаем, что эквивалентная шумовая температура терминала Explorer 110 (в градусах Кельвина) равна

$$T_r [^\circ\text{К}] = 10^{(27,2/10)} = 10^{2,72} = 524,81 \text{ }^\circ\text{К}. \quad (21)$$

4. В системе Inmarsat BGAN на восходящей линии терминал применяет множественный доступ типа FDMA/TDMA и использует модуляцию 16-QAM с символьной скоростью $V_s = 151,2$ киосимволов в секунду. Кадр передачи (Frame) типа R20T4.5X для восходящей линии имеет продолжительность $T_F = 20$ мс. Терминал пользователя может использовать единственный блок данных в каждом кадре. Полная структура кадра показана на рис. 2. Заметим, что система не предусматривает использование сигналов опорных станций в этом кадре.



Рис. 2. Структура кадра TDMA типа R20T4.5X на восходящей линии терминала BGAN

На рис. 2 показаны следующие элементы кадра:

- защитный интервал TDMA (Guard Time = GT): GT = 0,36 мс;
- преамбула или кодовое слово (Code Word – CW): CW = 18 символов;
- начальное уникальное (ключевое) слово (Unique Word 1 – UW1): UW1 = 40 символов;
- блоки данных одинаковой длины FB1 = FB2;
- конечное уникальное (ключевое) слово (Unique Word 2 – UW2): UW2 = 20 символов.

Вычислим бинарную скорость информации, приходящуюся на пользователя в килобитах в секунду [кбит/с] и эффективность кадра типа R20T4.5X [4].

Длительность символа T_s [мс] есть величина, обратная символьной скорости V_s :

$$T_s \text{ [мс]} = 1 / V_s = 1/151,2 \text{ [ксимв/с]} = 0,0066 \text{ мс.} \quad (22)$$

Для продолжительности кадра можно записать соответствие (23):

$$T_F = 20 \text{ мс} = 0,36 + (18 + 40 + 2 \cdot I_i + 20) \cdot T_s, \quad (23)$$

из формулы (23) следует, что каждый блок I_i в кадре содержит

$$I_i \text{ [симв]} = [20 - (0,36 + 78 \cdot 0,0066)] / (2 \cdot 0,0066) = (20 - 0,8748) / 0,0132 = 1448 \text{ символов, то есть} \quad (24)$$

$$FB1 = FB2 = I_i = 1448 \text{ модуляционных символов 16QAM.} \quad (25)$$

Бинарная скорость информации R_i , приходящаяся на одного пользователя, с учетом того, что модуляционный символ 16QAM содержит 4 бита, равна

$$R_i = 4 \cdot I_i / T_F = 4 \cdot 1448 / 20 = 289,6 \text{ кбит/с.} \quad (26)$$

Вычислим эффективность кадра η в процентах по формуле

$$\eta = T_u / T_F = (2 \cdot I_i \cdot T_s) / T_F = 2 \cdot 1448 \cdot 0,0066 / 20 = 0,95568 = 95,57 \%. \quad (27)$$

Заключение. В работе рассмотрен обобщенный алгоритм инженерного расчета параметров пользовательских спутниковых восходящей и нисходящей радиолоний. Расчетные формулы разделены на четыре группы, а алгоритм расчета разбит на четыре блока. Приведен пример расчета основных параметров широкополосных (Broadband) пользовательских восходящей и нисходящей радиолоний между терминалом Explorer 110, установленным на нефтедобывающей платформе, и спутником Inmarsat-4. Методику можно использовать в инженерных расчетах, курсовом и дипломном проектировании.

Список литературы

1. inmarsat.com
2. Richharia M. Satellite Systems for Personal Applications: Concepts and Technology / M. Richharia, L. D. Westbrook. — N. Y.: Wiley, 2011. — 476 p.
3. Цифровые терминалы спутниковых систем связи: справ. изд. / А. А. Ильин [и др.]; под общ. ред. Ю. М. Устинова. — СПб.: Деан, 2005. — 192 с., с ил.
4. Ильин А. А. О скорости передачи в широкополосных Broadband системах спутниковой связи. НТК ППС, НС и курсантов: тез. докл. / А. А. Ильин. — СПб.: Изд-во ГМА им. адм. С. О. Макарова, 2012. — Ч. 1. — 304 с.