

УДК 621.396.946+517.97

К выбору мощности бортового передатчика космических станций для цифровых систем спутниковой связи

Е. Е. Александров, О. Я. Рафалович

Харківський державний політехнічний університет, Харків

Надійшла до редакції 30.03.99

Розглянуто проблему побудови ефективних конфігурацій систем супутникового зв'язку. Наведено приклад аналізу цифрової системи супутникового зв'язку для регіону Воронеж—Харків—Волгоград—Ростов-на-Дону. На основі запропонованого критерію якості знайдено оптимальне значення потужності бортового передавача для розглядуваної системи. За допомогою розроблених алгоритмів та програмного забезпечення створено атлас регіональних карт ймовірності помилки для різних конфігурацій систем супутникового зв'язку.

Одним из основных направлений развития экономических систем спутниковой связи (ССС) является совершенствование энергетической подсистемы космических станций (КС) [2, 3, 9, 12—14]. Улучшение показателей этой подсистемы не только позволяет создавать более экономичные системы связи, но также является основой ряда новых служб, например персональной связи и передачи высококачественных телевизионных программ. Для реализации таких служб требуется значительно повысить плотность потока энергии. Среди наиболее перспективных в области спутниковой энергетики можно отметить: а) концентраторы солнечной энергии; б) высококачественные солнечные элементы (на основе арсенида галлия); в) КС (спутники), в которых связное оборудование и подсистема коррективы орбиты питаются только от аккумуляторов с улучшенными характеристиками или от водородно-кислородных топливных элементов; г) ионные двигатели, которые полностью обеспечивают электроэнергией все бортовые устройства и

системы коррективы орбиты и т. д. Однако проектирование и эксплуатация СССР требуют разработки не только отдельных элементов, но и синтеза оптимальных конфигураций СССР [2, 3].

Из вышеизложенного можно сделать вывод, что задача выбора оптимального значения мощности бортового передатчика КС СССР важна и актуальна. Одним из основных показателей СССР является качество передаваемой информации. Поэтому в качестве одного из возможных критериев оценки эффективности цифровой СССР необходимого для выбора оптимального значения мощности бортового передатчика КС может использоваться следующий [3, 7]:

$$U = Q^{\nu} / P^{\delta},$$

где Q — показатель общественной полезности СССР; P — мощность бортового передатчика КС; ν и δ отражают вес (значение) соответствующих факторов. Показатель общественной полезности системы связи Q можно, в свою очередь, представить в виде

$$Q = Q(x, y) = W(x, y)\sigma(x, y),$$

где $W(x, y) = 1/P_{\text{ом}}(x, y)$; $P_{\text{ом}}(x, y)$ — вероятность ошибки при передаче одного бинарного символа в точку региона (x, y) в условиях множественных помех; $\sigma(x, y)$ — плотность распределения потребителей информации в точке региона с координатами (x, y) .

Рассмотрим цифровые ССС с фазовой модуляцией на геостационарной орбите (ГО), получившие широкое распространение в спутниковой связи [2, 3, 6, 8—11], и оценим величину вероятности ошибки $P_{\text{ом}}(x, y)$.

Полезный сигнал, передаваемый КС, имеет вид

$$v_1(t) = \sum_{k=-\infty}^{\infty} p(t - kT) \cos[\omega_c t + a_k \theta(t - kT)],$$

где $p(t)$ — амплитудная модулирующая функция, T — тактовый интервал, ω_c — круговая частота полезного сигнала, $f_c = \omega_c/2\pi$ — частота полезного сигнала, a_k — k -й фазовый символ, $\theta(t)$ — фазовая модулирующая функция. Для М-ричной системы символ a_k обычно выбирается из множества

$$a_k \in \left\{ \frac{2\pi n}{M} \right\}, \quad n = 1, 2, \dots, M. \quad (1)$$

i -й мешающий сигнал можно представить в виде

$$v_i(t) = R_i(t) \cos[\omega_i t + \psi_i(t) + \mu_i], \quad i = 2, 3, \dots, N,$$

где R_i — огибающая сигнала, ω_i — круговая частота, $\psi_i(t)$ — фазовая функция, μ_i — фаза i -го мешающего сигнала, которая считается не зависящей от фазы других сигналов и функций, и равномерно распределенной на интервале $(0, 2\pi)$.

Цифровые мешающие сигналы имеют вид:

$$v_i(t) = \sum_{k_1=-\infty}^{\infty} r_i p_i(t - k_1 T_i - \tau_i) \cos[\omega_i t + a_{ik_1} k_1 \psi_i(t - k_1 T_i - \tau_i) + \mu_i],$$

где r_i — относительный уровень помехи, T_i — длительность символа, τ_i — смещение сигнала во времени (сдвиг символа), a_{ik_1} — коэффициент, который принадлежит множеству, аналогичному множеству (1), но не обязательно с ним совпадающему.

Каждый сигнал проходит через фильтр с эквивалентной низкочастотной функцией передачи $H_i(f)$ и соответствующим импульсным откликом $h_i(t)$. Поскольку все сигналы должны проходить через один и тот же приемник, характеризуемый функцией $H_{1r}(f)$ [или $h_{1r}(t)$], эта передаточная функция

является общей для всех $H_i(f)$. Предположим, что имеется идеальный фазовый приемник, который осуществляет посимвольную выборку мгновенных фаз β и принимает решение, что значение индекса фазовой модуляции $a_k = 2\pi n/M$, если

$$(2n - 1)\pi/M \leq \beta \leq (2n + 1)\pi/M.$$

Определив комплексные огибающие как

$$e_1(t) = \sum_{k=-\infty}^{\infty} p(t - kT) \exp[ja_k \theta(t - kT)],$$

$$e_i(t) = R_i(t) \exp[j\omega'_i t + \psi_i(t) + \mu_i], \quad i = 2, \dots, N,$$

где $\omega'_i = \omega_i - \omega_c$, получим выражение для комплексной огибающей на входе фазового детектора:

$$e(t) = n_c(t) + jn_s(t) + \sum_{i=1}^N e_i(t) \cdot h_i(t),$$

где $n_c(t)$ и $n_s(t)$ — синфазная и квадратурная составляющие шума на выходе фильтра приемника.

Предположим, что детектируется нулевой символ a_0 , для которого выборка происходит в момент $t = t_0$. Оценка фазы, по которой принимается решение, равна

$$\beta_0 \equiv \beta(t_0) = \arctg \frac{e_s(t_0)}{e_c(t_0)},$$

где $e_c(t_0)$ и $e_s(t_0)$ — соответственно действительная и мнимая части огибающей $e(t)$:

$$e_c(t_0) = s_{c0} + n_{c0} + x_{c0} + y_{c0},$$

$$e_s(t_0) = s_{s0} + n_{s0} + x_{s0} + y_{s0},$$

где s — составляющая сигнала, x — составляющая межсимвольных помех, y — составляющая помехи.

Используя модель ССС [1, 4, 10, 11] для вероятности $P_{\text{ом}}(x, y)$ ошибки при передаче одного бинарного символа в условиях множественных помех получим следующее выражение:

$$P_{\text{ом}}(x, y) = E[\operatorname{erfc}(\rho(x, y) \sin(\pi/M) + \rho(x, y)Z(x, y))],$$

где $E[.]$ — символ безусловного математического ожидания, $\operatorname{erfc}(x) = 2/\sqrt{\pi} \int_x^{\infty} \exp(-t^2) dt$ — дополни-

тельная функция ошибок, M — число положений фаз при фазовой модуляции, ρ^2 — отношение сигнал/шум по мощности, $Z = \sum_{j=1}^K R'_j \cos \varphi_j$ — случайная величина, описывающая влияние помехи, связанной с соседними КС, K — число мешающих КС, $R'_j = \sqrt{I_j}/S$, I_j — случайная величина, которая равномерно распределена на интервале $(0, 2\pi)$.

На базе статистического алгоритма расчета вероятности ошибки [5] разработаны алгоритмы и программное обеспечение для расчета и визуализации карт вероятности ошибки заданного региона для выбранной конфигурации системы связи.

С помощью созданного программного обеспечения была проанализирована ССС на ГО для обслуживания региона Воронеж—Харьков—Волгоград—Ростов-на-Дону, состоящая из четырех спутников. Приведем основные характеристики рассматриваемой модели ССС: тип модуляции — фазовая модуляция с $M = 4$; коэффициент использования площади поверхности антенны земной станции — 0.5; отношение диаметра антенны земной станции к длине волны — 100; расположение КС на ГО — 39.1° в. д. (для КС, ориентированной на Воронеж), 38.6° в. д. (Харьков), 40.1° в. д. (Волгоград), 39.6° в. д. (Ростов-на-Дону); угловой размер сечения луча антенн КС — 1.0° ; половина ширины основного лепестка луча антенн КС по уровню -3 дБ составляет 0.3° .

В рассматриваемом примере за величину плотности распределения потребителей информации σ была принята плотность населения (количество человек на 1 км^2) в выбранном регионе, а величина W определялась по правилу

$$W = \begin{cases} 10^1 & \text{для } P_{\text{ош}} > 10^{-1}, \\ 1/P_{\text{ош}} & \text{для } 10^{-1} \geq P_{\text{ош}} \geq 10^{-10}, \\ 10^{10} & \text{для } P_{\text{ош}} < 10^{-10}, \end{cases} \quad (2)$$

Значения величин ν и δ были приняты равными 1. Выбранный вариант регуляризации заметно не влияет на вклад надежного приема и ограничивает вклад неустойчивого приема информации.

Для описанного примера системы связи найдена оптимальная мощность бортового передатчика КС, равная 32 Вт, при этом погрешность вычислений мощности не превосходила 3 %.

На рис. 1 приведена зависимость показателя общественной полезности ССС Q от мощности бортового передатчика КС P . Из рисунка видно, что до точки $P = 30$ Вт происходит быстрое увеличение величины Q , после чего оно замедляется, и кривая приобретает монотонный устойчивый характер. Исходя из этого, а также промежуточных расчетов и вида плотности σ , можно сделать вывод, что после точки $P = 30$ Вт увеличение P слабо влияет на расширение зон устойчивого приема информации. Этот вывод подтверждает зависимость показателя эффективности ССС U от мощности P на рис. 2. При $P = 32$ Вт величина U достигает своего максимума ($U_{\text{max}} = 5.46 \cdot 10^9$). На рис. 3 и 4 изображены соответственно энергетическая карта величины сигнал/помеха и карта вероятности

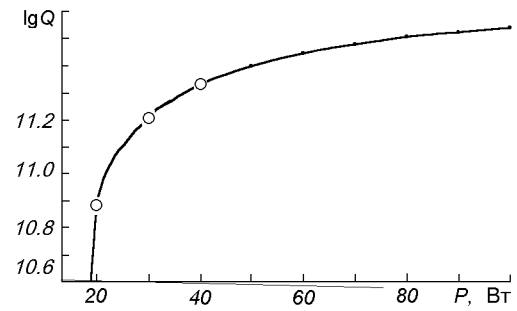


Рис. 1. Зависимость показателя общественной полезности ССС Q от мощности бортового передатчика КС P

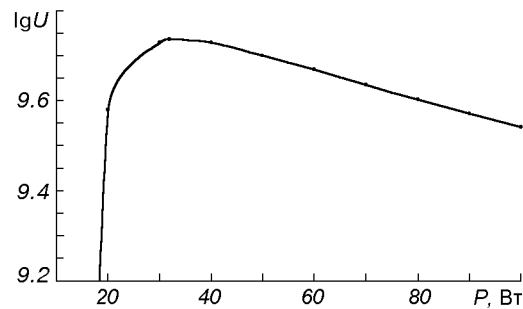


Рис. 2. Зависимость показателя эффективности ССС U от мощности бортового передатчика КС P

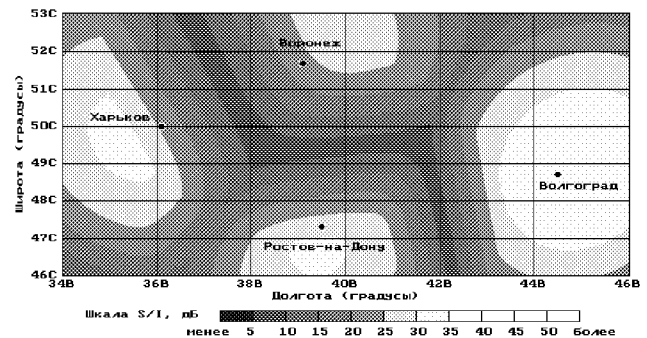


Рис. 3. Энергетическая карта величины сигнал/помеха для ССС региона Воронеж—Харьков—Волгоград—Ростов-на-Дону

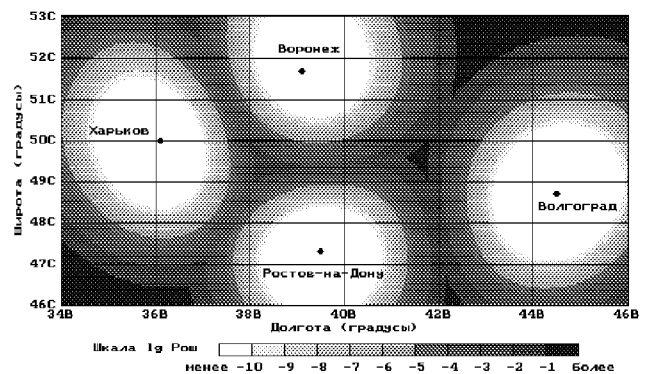


Рис. 4. Карта вероятности ошибки $P_{\text{ош}}(x, y)$ для ССС региона Воронеж—Харьков—Волгоград—Ростов-на-Дону

ошибки $P_{\text{ош}}(x, y)$ для ССС региона Воронеж—Харьков—Волгоград—Ростов-на-Дону при максимуме показателя эффективности ССС U ($P = 30$ Вт). Эта карта получена с учетом имеющихся сведений (1993 г.) о плотности населения в регионе. Из представленных рис. 1—4 видно, что существует оптимальное значение мощности бортового передатчика КС, действующее в рамках выбранной конфигурации системы, региона и используемого критерия. Таким образом, появляется возможность целенаправленно выбирать конфигурацию системы связи с учетом свойств региона.

Таким образом, в настоящей работе по предложенному критерию проведен анализ эффективности системы спутниковой связи региона Воронеж—Харьков—Волгоград—Ростов-на-Дону для выбора оптимального значения мощности бортового передатчика космических станций. Результаты расчетов оказались устойчивыми относительно выбора значений параметров регуляризационной процедуры (2). На базе построенных алгоритмов и программных средств создан атлас региональных карт вероятности ошибки для различных конфигураций систем спутниковой связи, образованных из местных каналов передач. На основе полученных в работе характеристик и заданного общего критерия качества можно решать задачу полного синтеза системы спутниковой связи.

1. Александров Е. Е., Мазманишвили А. С., Рафалович О. Я. Расчет вероятности ошибки при передаче фазоманипулированных сигналов в системах спутниковой связи для некоторых регионов Украины // Вестник науки и техники.—1997.—Вып. 1.—С. 48—52.
2. Калашников Н. И. Системы связи. — М.: Радио и связь, 1988.—428 с.
3. Кантор Л. Я., Тимофеев В. В. Спутниковая связь и проблема геостационарной орбиты. — М.: Радио и связь, 1988.—168 с.
4. Мазманишвили А. С., Рафалович О. Я. Пример построения региональных фазовых карт вероятности ошибок для выбранной конфигурации сети спутниковой связи // Элект-

ронное моделирование.—1997.—19, № 5.—С. 120—124.

5. Мазманишвили А. С., Рафалович О. Я. Численные модели помехоустойчивости для украинских региональных сетей спутниковой связи // Космічна наука і технологія.—1998.—4, № 1.—С. 92—101.
6. Окунев Ю. Б. Цифровая передача информации фазомодулированными сигналами. — М.: Радио и связь, 1991.—286 с.
7. Рафалович О. Я. Анализ цифровых систем спутниковой связи по критерию помехоустойчивости приема-передачи информации // Радиотехника. Всеукр. межвед. науч.-техн. сб.—1997.—Вып. 104.—С. 134—137.
8. Спилкер Дж. Цифровая спутниковая связь: Пер. с англ. — М.: Связь, 1979.—592 с.
9. Bartholome P. Digital satellite networks in Europe // Proc. IEEE.—1984.—72, N 11.—P. 1469—1482.
10. Jansky D. M., Jeruchim M. C. Communications satellite in the geostationary orbit. — N. Y.: Artech. House Inc., 1983.—519 p.
11. Jeruchim M. C. A survey of interference problems and applications to geostationary satellite networks // Proc. IEEE.—1977.—65, N 3.—P. 317—331.
12. Mileant A., Hinedi S. Overview of arraying techniques for deep space communications // IEEE Trans. Commun.—1994.—Pt. 3, 42, N 2—4.—P. 1856—1865.
13. Pelton J. N. Satellite telenets: a techno-economic assessment of major trends for the future // Proc. IEEE.—1984.—72, N 11.—P. 1445—1456.
14. Wu W. W., Miller E. F., Pritchard W. L. Mobile satellite communications // Proc. IEEE.—1994.—82, N 9.—P. 1431—1448.

CHOOSING THE POWER OF AIRBORNE TRANSMITTERS IN THE SPACE STATIONS FOR DIGITAL SATELLITE COMMUNICATION SYSTEMS

Ye. Ye. Alexandrov, O. Ya. Rafalovich

The construction of effective configuration for satellite communication systems is discussed. As an example, we analyse the digital satellite communication system for the Voronezh — Kharkiv — Volgograd — Rostov-na-Donu region. Based on the proposed performance criterion, we found the optimal power of the airborne transmitter for the space stations of this communication system. Regional maps of the error probability for different configurations of satellite communication systems were constructed with the use of the developed algorithms and software.