

## Раздел V. Безопасность телекоммуникаций

УДК 621.371.3: 621.396.96

**А.Ф. Чипига**

### МЕТОДИКА ЭНЕРГЕТИЧЕСКОГО РАСЧЕТА СПУТНИКОВОЙ РАДИОЛИНИИ НА ПОНИЖЕННЫХ ЧАСТОТАХ

*С точки зрения обеспечения информационной безопасности основное достоинство систем спутниковой связи (ССС) – обеспечение высокого качества, т. е. помехоустойчивости связи, при неограниченных дальностях и обширных зонах покрытия – определяет один из основных недостатков СССР: доступность электромагнитного излучения искусственного спутника Земли для систем радиоразведки несанкционированных пользователей. Недостаток устраняется путем применения способа защиты информации в СССР за счет использования пониженных несущих частот и разнесенного в пространстве приема на несколько антенн. Результаты расчета спутниковой радиолинии на пониженных частотах с применением разработанной методики энергетического расчета показывают возможность получения на практике высокого уровня энергетической скрытности СССР, работающих на пониженных частотах.*

*Спутниковая связь; пониженная частота; отношение сигнал/шум; множитель ослабления волны; поглощение в ионосфере.*

**A.F. Chipiga**

### METHOD OF CALCULATION OF ENERGY SATELLITE RADIO AT REDUCED FREQUENCIES

*From the point of view of ensuring the information security of the main advantage of satellite communication systems (SCS) is to provide high quality, i.e. noise immunity of communication, with unlimited distance and extensive coverage areas – defines one of the main shortcomings of the SCS: the availability of electromagnetic radiation of artificial Earth satellites for monitoring systems of unauthorized users. Shortcoming will be resolved by the application of the method of protection of the information in the SCS through the use of low frequency and diversity in the space of admission to multiple antennas. The results of calculations of satellite radio communication at low frequencies using the developed method of the energy calculation show the possibility to obtain in practice a high level of energy secrecy SCS, operating at lower frequencies.*

*Satellite; under frequency; signal/noise attenuation factors wave absorption in the ionosphere.*

Известен [1, 2] способ обеспечения очень высокого коэффициента энергетической скрытности ( $\gamma_{\text{эс}} > 30$  дБ) системы спутниковой связи (ССС) при близком размещении приемника (ПРМ) радиоперехвата (РПХ) за счет понижения несущей частоты до  $f_0 = 60 \dots 80$  МГц и применения пространственно-разнесенного приема сигналов на несколько антенн ( $n \geq 4$ ).

Результаты анализа помехоустойчивости таких СССР показали [1], что достижение вероятности ошибочного приема информационных символов ( $P_{\text{ош}}$ ) не хуже допустимого значения  $P_{\text{ош}} \leq P_{\text{ош доп}} = 10^{-5}$  возможно при условии, что на выходе каждой ветви разнесения (т.е. входе каждого ПРМ) реализуется энергетическое

отношение сигнал/шум  $h^2 = 60$  (т.е. 18 дБ). При этом реализовать такое отношение С/Ш при снижении  $f_0$  с 1 ГГц до 80...60 МГц возможно за счет одновременного уменьшения скорости передачи (в 13...70 раз) и увеличения диаметра параболической приемной антенны (в 4...2 раза).

Однако в диапазоне  $f_0 = 50...100$  МГц используются другие типы антенн (спиральные, волновой канал и т.п.), а снижение скорости передачи в ССС нежелательно. Поэтому целесообразно определить иные пути реализации  $h^2 = 60$ . Для этого представляется необходимым разработать методику энергетического расчета спутниковой радиолинии космический аппарат (КА) – земная станция (ЗС) при использовании в ССС пониженных частот ( $f_0 = 50...100$  МГц).

Целью статьи является разработка методики энергетического расчета радиолинии космический аппарат – земная станция на пониженных частотах.

Для достижения поставленной цели сначала проанализируем выражение для реализуемого энергетического отношения С/Ш на входе ПРМ ССС, которое в случае передачи простых сигналов (т.е. с базой  $B_s = T_s \Delta F_0 = 1$ , где  $T_s$  и  $\Delta F_0$  – длительность и ширина спектра сигналов) можно записать в виде [1]

$$h^2 = \frac{E_r}{N_0} = \frac{P_r}{P_0} = \frac{P_t G_t \eta_t G_r \eta_r W_0^2 W_n^2}{P_0} = 60 \text{ (18дБ)}. \quad (1)$$

Здесь  $E_r = P_r T_s$  – энергия принимаемого сигнала с мощностью  $P_r$  и длительностью  $T_s$ ;  $N_0 = P_0 / \Delta F_0$  – спектральная плотность мощности  $P_0$  шума (помех) на входе ПРМ в полосе сигнала  $\Delta F_0$ ;  $P_t$  – мощность сигнала на выходе передатчика (ПРД);  $G_{t,r}$  – коэффициенты усиления (КУ) передающей ( $t$ ) и приемной ( $r$ ) антенн;  $\eta_{t,r}$  – коэффициенты полезного действия (КПД) фидеров передающей ( $t$ ) и приемной ( $r$ ) антенн;  $W_0^2 = (\lambda_0 / 4\pi z_0)^2$  – множитель ослабления волны с длиной  $\lambda_0$  в свободном пространстве на расстоянии  $z_0$ ;  $W_n^2 \leq 1$  – коэффициент поглощения энергии волны в ионосфере.

Известно [3] несколько типов методик энергетического расчета спутниковых радиолиний на традиционных частотах  $f_0 \approx 1...10$  ГГц. Наиболее известной является методика 1-го типа, которая сводится к анализу выполнения условия превышения  $h^2 > h_{\text{доп}}^2$  реализуемого отношения С/Ш на входе ПРМ ССС ( $h^2$ ) над минимально необходимым (допустимым) значением ( $h_{\text{доп}}^2 = 10...20$  дБ) при заданных параметрах передатчика ( $P_t$ ), антенн ( $G_t, \eta_t$  и  $G_r, \eta_r$ ) и высоте орбиты космического аппарата ( $H_{\text{ка}}$ ). Согласно [3] условие  $h^2 > h_{\text{доп}}^2$  выполняется при традиционных значениях несущих частот  $f_0 \approx 1...10$  ГГц и типовых параметрах существующих ССС (с высотой орбиты  $H_{\text{ка}} \approx 40$  тыс. км):  $P_t \approx 20$  Вт;  $G_t \approx 20$  дБ;  $G_r \approx 40$  дБ;  $\eta_{t,r} \approx -0,5$  дБ;  $W_0^2 \approx -200$  дБ;  $W_n^2 \approx 0,1$  дБ;  $P_0 \approx -150$  дБ.

Методика 2-го типа сводится к определению технических параметров средств радиосвязи (мощности передатчика  $P_t$  или КУ приемной антенны  $G_r$ ) при заданном КУ передающей антенны ( $G_t$ ) и отношении С/Ш на входе ПРМ ССС ( $h^2 = h_{\text{зад}}^2$ ) с известной высотой орбиты космического аппарата ( $H_{\text{ка}}$ ).

Для достижения поставленной цели необходимо разработать методику энергетического расчета спутниковой радиолинии 2-го типа для диапазона пониженных частот  $f_0 = 50...100$  МГц. В соответствии с формулой (1) она сводится к следующим этапам:

1. На основе анализа помеховой обстановки в точке приема определить мощность шума на входе ПРМ ( $P_0$ ).

2. Определить дальность связи  $z_0$  и множитель ослабления поля в свободном пространстве  $W_0$ .

3. Определить множитель ослабления на трассе  $W_m$ .

4. При заданных значениях ряда параметров (например,  $G_t$ ,  $\eta_{t,r}$ , и  $h_{зад}^2 = 18$  дБ) определить мощность ПРД КА  $P_t$  (при фиксированном  $G_r$ ) или коэффициент усиления приемной антенны ЗС  $G_r$  (при фиксированной  $P_t$ ).

Рассмотрим подробнее содержание этих этапов.

1. Анализ помеховой обстановки в точке приема для радиолинии КА ЗС на частоте  $f_0 = 50...100$  МГц показывает, что полная (суммарная) эквивалентная шумовая температура приемной системы ( $T_\Sigma$ ) определяется шумовыми температурами промышленных помех ( $T_H$ ), космического пространства ( $T_K$ ) и приемника  $T_{ПРМ} = [T_0(N - 1)]$ . Поэтому мощность шума на входе ПРМ описывается выражением вида

$$P_0 = k_B T_\Sigma \Delta F_0 = k_B \Delta F_0 [\eta_r (T_H + T_K) + T_0 (N - 1)], \quad (2)$$

где  $k_B$  – постоянная Больцмана;  $T_0 = 290^\circ$ ;  $N$  – коэффициент шума приемника.

2. Множитель ослабления поля в свободном пространстве  $W_0$  зависит от дальности спутниковой связи, которая определяется по формуле [3]:

$$z_{0[км]} = \sqrt{(H_{ка} + R_3)^2 + R_3^2 - 2(H_{ка} + R_3)R_3 \cos \psi}, \quad (3)$$

где  $R_3 = 6370$  км – радиус Земли,  $\psi$  – угол, проведенный из центра Земли, между направлениями на ЗС и КА.

Для ориентировочных расчетов можно считать, что для геостационарных ( $H_{ка} = 36000$  км) и высокоэллиптических ( $H_{ка} = 40000$  км) КА справедливо соотношение  $H_{ка} \gg R_3$ , при котором  $z_0 \approx H_{ка}$ . Поэтому множитель ослабления поля в свободном пространстве  $W_0$  при дальности спутниковой связи  $z_0 \approx H_{ка}$  определяется по формуле

$$W_0^2 \text{ дБ} = 20 \lg \left( \frac{\lambda_0}{4\pi H_{ка}} \right) = 20 \lg \left( \frac{c}{4\pi f_0 H_{ка}} \right). \quad (4)$$

Анализ графиков на рис. 1, построенных согласно (4), позволяет сделать следующие выводы:

а) переход ССС с традиционных частот ( $f_0 \approx 1$  ГГц) на пониженные частоты ( $f_0 = 50 \div 100$  МГц) позволяет уменьшить множитель ослабления волн в свободном пространстве  $W_0^2$  примерно на 25 дБ при любой высоте орбиты КА;

б) переход от высокоэллиптических ( $H_{ка} \approx 40000$  км) и геостационарных ( $H_{ка} \approx 36000$  км) орбит КА к средневысотным ( $H_{ка} \approx 10000$  км) и низковысотным ( $H_{ка} \approx 1000$ ) позволяет дополнительно уменьшить  $W_0^2$  на 15 дБ и 36 дБ соответственно.

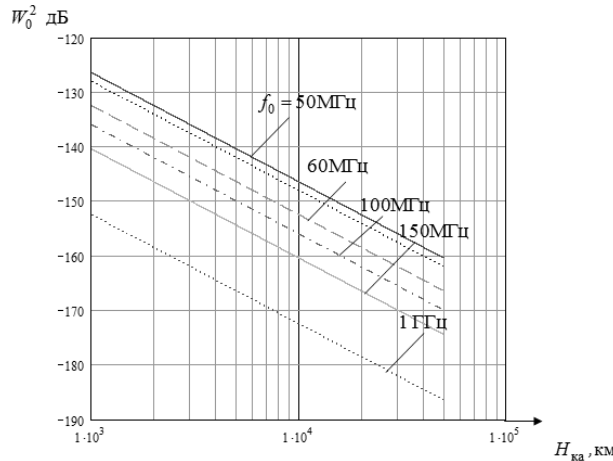


Рис. 1. Зависимость множителя ослабления в свободном пространстве от высоты КА и частоты волны ( $f_0 = 50$  МГц...1 ГГц)

3. Анализ множителя ослабления на трассе ( $W_T^2$ ) распространения радиоволн (РРВ) от КА до ЗС показывает [3], что при использовании обычных частот  $f_0 = 1...30$  ГГц он определяется поглощением в тропосфере ( $W_T^2 \approx W_{п(тр)}^2$ ), а при использовании пониженных частот ( $f_0 = 50 \div 100$  МГц) - поглощением в ионосфере ( $W_T^2 \approx W_{п}^2$ ).

Поглощение радиоволн в ионосфере  $W_{п}^2$  оценивается по графику (рис. 2), приведенному в [4]. В диапазоне 60...100 МГц множитель  $W_{п}^2$  даже в случае низких углов возвышения приемной антенны ( $\beta = 5^\circ$ ) не превышает значения - 5,4 дБ.

4. Мощность бортового ретранслятора  $P_1$  (Вт) при фиксированном КУ приемной антенны ( $G_r$ ) определяется согласно (1, 2) по формуле:

$$P_t = \frac{k_B \cdot B \cdot T_{\Sigma} \cdot h_{зад}^2}{\eta_t \cdot G_t \cdot W_0^2 \cdot W_T^2 \cdot G_r \cdot \eta_r} \approx \frac{k_B \cdot B \cdot [\eta_r \cdot (T_{и} + T_{к}) + T_0(N-1)] \cdot h_{зад}^2}{\eta_t \cdot G_t \cdot W_0^2 \cdot W_{п}^2 \cdot G_r \cdot \eta_r} \quad (5)$$

Коэффициент усиления антенны ЗС при фиксированной мощности ПРД КА ( $P_1$ ) определяется согласно (6) как

$$G_r = \frac{k_B \cdot B \cdot T_{\Sigma} \cdot h_{зад}^2}{P_t \cdot \eta_t \cdot G_t \cdot W_0^2 \cdot W_T^2 \cdot \eta_r} \approx \frac{k_B \cdot B \cdot [\eta_r \cdot (T_{и} + T_{к}) + T_0(N-1)] \cdot h_{зад}^2}{P_t \cdot \eta_t \cdot G_t \cdot W_0^2 \cdot W_{п}^2 \cdot \eta_r} \quad (6)$$

Приведем пример расчета мощности ПРД КА ( $P_1$ ) на пониженной частоте согласно (1–5) при следующих исходных данных: 1) несущая частота  $f = 60$  МГц; 2) коэффициент усиления передающей антенны КА  $G_t = 10$  дБ (антенна «волно-

вой канал» длиной  $L_A \approx 8$  м); 3) коэффициент усиления приемной антенны ЗС  $G_r = 15$  дБ (фазированная антенная решетка (ФАР) из четырех антенн «волновой канал» длиной  $L_A \approx 8$  м, расстояние между антеннами  $d_A \approx 2,5$  м), 4) КПД волнового тракта  $\eta_t = 0,9$ ; 5) высота орбиты КА –  $H_{ка} = 40000$  км,  $10000$  км и  $1000$  км; 6) полоса пропускания приемника  $B = 480000$  Гц; 7) коэффициент шума приемника  $N = 15$ ; 8) требуемое отношение сигнал/шум на входе приемника  $h_{зад}^2 = 18$  дБ; 9) КПД антенно-фидерного тракта на приеме  $\eta_r = 0,35$ .

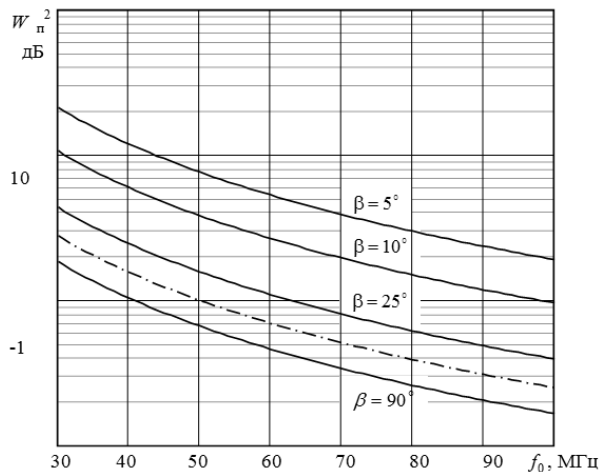


Рис. 2. Зависимость множителя поглощения ионосферы от несущей частоты и угла возвышения приемной антенны

Результаты расчета  $P_t$  согласно (5) представлены в табл. 1. Ее анализ показывает, что для достижения требуемого отношения С/Ш ( $h_{зад}^2 = 18$  дБ) при работе ССС на пониженной частоте  $f_0 = 60$  МГц и использовании типовых для диапазона метровых волн (МВ) антенн «волновой канал» (одиночной на КА и счетверенной на ЗС) с коэффициентами усиления (КУ)  $G_t = 10$  дБ и  $G_r = 15$  дБ необходимо использовать бортовые ПРД с очень малой мощностью излучения  $P_t = 1,63$  Вт для низковысотного КА ( $H_{ка} \approx 1000$  км), средней мощности  $P_t = 163,4$  Вт для средневысотных КА ( $H_{ка} \approx 10000$  км) и большой мощности  $P_t = 2614$  Вт для высокоэллиптических ( $H_{ка} \approx 40000$  км) КА.

Отсюда следует, что применение в диапазоне пониженных частот ( $f_0 = 60 \div 70$  МГц) передающей и приемной антенн типа «волновой канал» с КУ, ограниченными значениями  $G_t \leq 10$  дБ и  $G_r \leq 15$  дБ (при которых их массогабаритные показатели остаются относительно небольшими:  $L_A \approx 8$  м), позволяет реализовать требуемое (1) отношение С/Ш на входе ПРМ ЗС  $h_{зад}^2 = 18$  дБ при использовании КА с низкими и средними орбитами. В этих случаях требуются ПРД с мощностями  $P_t = 1,63$  Вт и  $P_t = 163,4$  Вт, которые легко реализуются в диапазоне МВ. При использовании высокоорбитальных КА требуются бортовые ПРД с мощ-

ностью  $P_t = 2614$  Вт. Такие мощности излучения бортовых ПРД в диапазоне МВ без существенного роста массогабаритных показателей принципиально возможно реализовать за счет применения транзисторов с использованием методов сложения мощностей.

Таблица 1

Результаты расчета мощности бортового ПРД КА

$H_{\text{ка(км)}}$	$G_t$	$G_r$	$T_{\Sigma(K^\circ)}$	$P_0$ (Вт)	$W_{\text{п}}^2$	$W_0^2$	$P_t$ (Вт)
$4 \cdot 10^4$	$\frac{10}{10\text{дБ}}$	$\frac{31,6}{15\text{дБ}}$	$\frac{2853}{44,6\text{дБ}}$	$\frac{4 \cdot 10^{-19}}{-184\text{дБ}}$	$\frac{0,45}{-3,5\text{дБ}}$	$\frac{10^{-16}}{-160\text{дБ}}$	$\frac{2614}{34,2\text{дБ}}$
$10^4$	$\frac{10}{10\text{дБ}}$	$\frac{31,6}{15\text{дБ}}$	$\frac{2853}{44,6\text{дБ}}$	$\frac{4 \cdot 10^{-19}}{-184\text{дБ}}$	$\frac{0,45}{-3,5\text{дБ}}$	$\frac{1,6 \cdot 10^{-15}}{-148\text{дБ}}$	$\frac{163,4}{22,1\text{дБ}}$
$10^3$	$\frac{10}{10\text{дБ}}$	$\frac{31,6}{15\text{дБ}}$	$\frac{2853}{44,6\text{дБ}}$	$\frac{4 \cdot 10^{-19}}{-184\text{дБ}}$	$\frac{0,45}{-3,5\text{дБ}}$	$\frac{1,6 \cdot 10^{-13}}{-128\text{дБ}}$	$\frac{1,63}{2,1\text{дБ}}$

Таким образом, разработана методика энергетического расчета радиолинии КА – ЗС на пониженных частотах ( $f_0 = 60 \div 70$  МГц) согласно выражениям (1–6). Результаты этой методики указывают на то, что по сравнению с традиционным диапазоном частот ( $f_0 \approx 1 \dots 10$  ГГц) имеют место следующие особенности: 1) увеличение мощности шума на входе ПРМ ЗС (и  $P_0$ ) на величину порядка 30 дБ из-за повышения шумовых температур, обусловленных индустриальными ( $T_{\text{и}}$ ) и космическими ( $T_{\text{к}}$ ) помехами; 2) незначительное увеличение поглощения сигнала в ионосфере  $W_{\text{п}}^2$  (на несколько дБ); 3) уменьшение ослабления сигнала в свободном пространстве  $W_0^2$  на 25 дБ при любой высоте орбиты КА.

Отсюда следует, что при переходе ССС в диапазон пониженных частот увеличение мощности шума и ионосферного поглощения в значительной мере компенсируется уменьшением ослабления в свободном пространстве и возможностью реализации в диапазоне МВ мощности ПРД КА  $P_t \sim 10^3$  Вт. Эти факторы определяют возможность практической реализации требуемого отношения С/Ш на входе ПРМ  $h^2 = 60$  (18 дБ) ССС, использующих пониженные частоты.

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Чипига А.Ф., Сенокосова А.В. Защита информации в системах космической связи за счет изменения условий распространения радиоволн // Космические исследования. – 2007. – Т. 45, № 1. – С. 59-66.
2. Чипига, А. Ф., Сенокосова А.В. Способ обеспечения энергетической скрытности систем спутниковой связи // Космические исследования. – 2009. – Т. 47, № 5. – С. 428-433.
3. Мешалкин В.А., Сосунов Б.В. Основы энергетического расчета радиоканалов. – Л.: ВАС, 1991. – 110 с.
4. Сенокосова А.В., Солчатов М.Э., Стрекалов А.В., Чипига А.Ф. Математическая модель ионосферы для оценки поглощения радиоволн в системах космической связи // Информационные технологии. – 2006. – Т. 4, № 1. – С. 77-82.

Статью рекомендовал к опубликованию д.т.н., профессор О.Б. Макаревич.

**Чипига Александр Федорович** – Северо-Кавказский федеральный университет; .e-mail: zik@ncstu.ru; 355000 г. Ставрополь, ул. Десантников 25, тел.: 88652956546; директор института информационных технологий и телекоммуникаций; к.т.н.; профессор.

**Chipiga Alexander Fyodorovich** – North Caucasus Federal University; e-mail: zik@ncstu.ru; 25, Desantnikov street, Stavropol, 355000, Russia; phone: +78652956546; director of the Institute of information technology and telecommunications; dr. of eng. sc.; professor.

УДК 621.396.2

**Е.И. Кротова**

**МОДЕЛИРОВАНИЕ АЛГОРИТМА КОНТРОЛЯ КАЧЕСТВА ПРИЕМА СИГНАЛА С КОДИРОВАНИЕМ В ЦИФРОВОЙ СИСТЕМЕ СВЯЗИ ПРИ ВОЗДЕЙСТВИИ НЕГАУССОВСКИХ ПОМЕХ**

*Целью данного исследования является моделирование метода повышения качества приема манипулированных сигналов в системе связи с кодированием на основе идентификации видов законов распределения сигналов и помех. В статье представлены результаты имитационного и физического моделирования алгоритма, позволяющего определить помехоустойчивые коды для нескольких видов часто встречающихся помех и количественно оценить наличие помехи в принимаемом сигнале с различными видами модуляции в реальном времени. Результаты могут быть использованы при решении задач обнаружения и различения сигналов в цифровых системах связи при передаче для повышения эффективности работы демодулятора и декодера.*

*Цифровая система связи; кодирование; информация; сигнал; помехи; идентификация.*

**E.I. Krotova**

**MODELLING OF ALGORITHM OF QUALITY ASSURANCE OF RECEPTION OF THE SIGNAL WITH CODING IN DIGITAL SYSTEM OF COMMUNICATION AT INFLUENCE NON-GAUSSIAN OF HANDICAPES**

*The purpose of the given research is modelling a method of improvement of quality of reception modulated signals in system of communication with coding on the basis of identification of kinds of laws of distribution of signals and handicapes. In article results of imitating and physical modelling of the algorithm are submitted, allowing to determine noiseproof codes for several kinds frequently meeting handicapes and quantitatively to estimate presence of a handicap in an accepted signal with various kinds of modulation in real time. Results can be used at the decision of problems of detection and distinction of signals in digital systems of communication conection by transfer for increase of an overall performance of the demodulator and the decoder.*

*Digital system of communication; coding; the information; a signal; handicaps; identification.*

При воздействии помехи на сигнал вид распределения плотности вероятности массива значений сигнала будет изменяться.

Если значения сигнала и помехи рассматривать как случайные величины, то их суммирование (рассматриваем только аддитивную смесь) сводится к суммированию случайных величин. Но при суммировании случайных величин законы их распределения резко изменяют свою форму. Закон распределения суммы независимых случайных величин  $p(x)=p(x_1+x_2)$  имеющих распределения  $p(x_1)$  и  $p(x_2)$ , называется *композицией* и выражается интегралом свертки

$$p(x) = \int_{-\infty}^{\infty} p_1(z) p_2(x-z) dz \quad (1)$$