

## **ОЦЕНКА ОПЕРАТИВНОСТИ ДОСТАВКИ ИНФОРМАЦИИ ПО ВЫСОКОСКОРОСТНОЙ РАДИОЛИНИИ КОСМИЧЕСКИХ СИСТЕМ ДИСТАНЦИОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ ЗЕМЛИ**

**А. А. Кащеев**

**ФГБОУ ВО «Рязанский государственный радиотехнический университет»**

Статья поступила в редакцию 11 апреля 2016 г., после доработки – 17 августа 2016 г.

**Аннотация.** В статье рассматривается задача оценки оперативности доставки информации по высокоскоростной радиолинии (ВРЛ) космических систем дистанционного зондирования Земли с учетом надежности ВРЛ и объема канального кадра. На основе формулы Шеннона с учётом энергетических соотношений для линий спутниковой связи, необходимой ширины полосы пропускания, объема канального кадра и вероятности битовой ошибки передачи информации предложены математические выражения для оценки пропускной способности радиолинии и времени передачи информации на наземный пункт приема. Исследовано влияние вероятности битовой ошибки передачи информации и основных параметров радиосигнала (скорость помехоустойчивого кодирования и индекс фазовой манипуляции сигнала) на величину пропускной способности ВРЛ и времени передачи информации на наземный пункт приема.

**Ключевые слова:** пропускная способность; космические аппараты; бортовое запоминающее устройство; наземный пункт приёма информации; высокоскоростная радиолиния; оперативность доставки информации; дистанционное зондирование Земли.

**Abstract.** The article considers the problem of improving the accuracy of estimation of efficiency of information delivery via high-speed radio link (VRL) of space systems of remote sounding of the Earth with consideration of the reliability of the VRL and the amount of frame data link layer. Based on the Shannon formula taking into account the energy ratios for the lines of satellite communication, the necessary bandwidth, the volume of the channel frame and the probability of error in

information transmission mathematical expressions for bandwidth estimation of the radio link and the transmission time information to the ground receiving point. The influence of the probability of bit error in information transmission and the main parameters of the radio signal (speed error-correcting coding and the index of phase manipulation signal) on the value of VRL bandwidth and transmission time information to the ground receiving point.

**Keywords:** bandwidth; space vehicles; onboard storage device; a ground point information; High-speed radio systems; the speed of delivery of information; Space remote sensing.

## **Введение**

На этапе разработки требований к аппаратуре специального назначения космических аппаратов дистанционного зондирования Земли (КА ДЗЗ) и проектирования ВРЛ одной из важнейших задач является априорная оценка оперативности доставки информации космической системы (КС) ДЗЗ, от объективности которой зависят точность планирования работы бортовой аппаратуры ВРЛ и достоверность подтверждения тактико-технических характеристик системы.

Одним из основных показателей оперативности доставки информации КС ДЗЗ в режиме воспроизведения является время передачи информации на наземный пункт приема информации (НППИ) [1, 2], которое существенным образом зависит от пропускной способности радиолинии и вероятности битовой ошибки передачи информации.

Оценка времени передачи информации на НППИ осуществляется через пропускную способность радиолинии, определяемую формулой Шеннона [4], где в свою очередь не учитывается одна из основных характеристик передаваемого сигнала - объем канального кадра. Целью настоящей работы является решение указанной проблемы.

## **Постановка задачи**

Целью работы является оценка времени передачи информации на НППИ

по ВРЛ с учетом вероятности битовой ошибки передачи информации и объема канального кадра.

Модель высокоскоростной радиолинии предполагает следующее: радиолиния организуется с помощью наземной аппаратуры (НА) ВРЛ и бортовой аппаратуры (БА) ВРЛ, устанавливаемой на космическом аппарате дистанционного зондирования Земли (КА ДЗЗ) с линейными координатами движения центра масс в топоцентрической системе координат  $x_{i,j}^{tpsk}$ ,  $y_{i,j}^{tpsk}$  и  $z_{i,j}^{tpsk}$ .

На вход БА ВРЛ поступают данные маршрутов съемки земной поверхности в цифровой форме объемом  $V_{i,j}$ , которые затем подвергаются помехоустойчивому кодированию по методу Viterbi со скоростью  $r$ , мультиплексированию в канальные кадры объемом  $V_k$ , записью в бортовое запоминающее устройство (БЗУ), фазовой манипуляции с индексом  $m$  и передаче на наземную аппаратуру ВРЛ. Также предполагается статистическая независимость бит в канальном кадре.

### Оценка пропускной способности высокоскоростной радиолинии

В процессе наблюдения земной поверхности КА ДЗЗ передача информации осуществляется при нахождении космического аппарата в зоне радиовидимости НППИ, а за ее пределами накопление информации происходит в БЗУ. Пропускная способность канала ВРЛ, как правило, определяется необходимой шириной полосы пропускания и отношением сигнал/шум на входе приёмного устройства в соответствии с формулой Шеннона [4]:

$$C = \Delta f \cdot \log_2 \left[ 1 + \left( \frac{P_{i,j}^{НППИ}}{P_{i,j}^{ш}} \right) \right], \quad (1)$$

где  $\Delta f$  - ширина полосы пропускания приёмника НА ВРЛ;  $P_{i,j}^{НППИ}$  - мощность полезного сигнала на входе приёмника НА ВРЛ  $i$ -го НППИ в  $j$ -й момент времени;  $P_{i,j}^{ш}$  - мощность шума на входе оборудования НА ВРЛ  $i$ -го НППИ.

Учитывая основные энергетические соотношения для линий спутниковой

связи [5, 6], величина  $P_{i,j}^{НППИ}$  может быть определена как:

$$P_{i,j}^{НППИ} = \frac{(c / f_n)^2 P^{КА} \eta^{КА} G_i^{КА} G_i^{НППИ} \eta_i^{НППИ}}{16\pi^2 D_{i,j}^2 L_{i,j}^{\text{don}}}, \quad (2)$$

где  $D_{i,j} = \sqrt{(x_{i,j}^{tpsk})^2 + (y_{i,j}^{tpsk})^2 + (z_{i,j}^{tpsk})^2}$  - дальность от КА ДЗЗ до  $i$ -го НППИ;  $x_{i,j}^{tpsk}$ ,  $y_{i,j}^{tpsk}$  и  $z_{i,j}^{tpsk}$  - линейные координаты движения центра масс КА в топоцентрической системе координат в  $j$ -й момент времени, связанной с  $i$ -м НППИ;  $L_{i,j}^{\text{don}}$  - дополнительное затухание энергии радиосигнала между КА и  $i$ -м НППИ в  $j$ -й момент времени;  $G_i^{КА}$  и  $G_i^{НППИ}$  - коэффициенты усиления антенны БА ВРЛ КА ДЗЗ на передачу и НА ВРЛ на приём соответственно;  $\eta^{КА}$  и  $\eta_i^{НППИ}$  - коэффициент передачи антенно-волноводного тракта БА ВРЛ КА и НА ВРЛ  $i$ -го НППИ;  $c \approx 3 \cdot 10^8$  м/с - скорость света.

Мощность шума на входе НА ВРЛ  $i$ -го НППИ можно рассчитать по формуле [6]:

$$P_{i,j}^u = kT_{i,j}^{\Sigma} \Delta f_u, \quad (3)$$

где  $k = 1,38 \cdot 10^{-23}$  Вт/Гц·град – постоянная Больцмана;  $T_{i,j}^{\Sigma}$  - эквивалентная шумовая температура приёмной системы НА ВРЛ  $i$ -го НППИ в  $j$ -й момент времени с учётом внутренних и внешних шумов;  $\Delta f_u$  - эквивалентная (энергетическая) шумовая полоса приёмника.

Предполагается, что величина  $\Delta f_u$  равна ширине спектра передаваемого сигнала и в соответствии с формулой [5], а также учитывая скорость блочного помехоустойчивого кодирования, может быть определена как:

$$\Delta f_u \approx \Delta f \approx \frac{1,2 \cdot R}{r \cdot \log_2 m}, \quad (4)$$

где  $R$  – скорость передачи информации между БА ВРЛ КА ДЗЗ и НА ВРЛ НППИ;  $r$  – скорость помехоустойчивого кодирования;  $m$  – индекс фазовой манипуляции сигнала.

Так как информация по радиолинии передается кадрами объемом  $V_k$  с вероятностью битовой ошибки передачи  $p$ , а также учитывая выражение для достоверной передачи информации в кадре [7, 8], формула (4) примет следующий вид:

$$\Delta f_u \approx \frac{1,2 \cdot R \cdot (1-p)^{V_k}}{r \cdot \log_2 m}, \quad (5)$$

Учитывая (2), (3), (4) и (5), выражение для пропускной способности (1) можно представить следующим образом:

$$C = \frac{1,2 \cdot R \cdot (1-p)^{V_k}}{r \cdot \log_2 m} \log_2 \left[ 1 + \left( \frac{r \cdot \log_2 m \cdot (c/f_n)^2 P^{KA} \eta_i^{KA} G_i^{KA} G_i^{НППИ} \eta_i^{НППИ}}{16\pi^2 D_{i,j}^2 L_{i,j}^{don} k \cdot 1,2 \cdot R \cdot T_{i,j}^\Sigma \cdot (1-p)^{V_k}} \right) \right]$$

Однако, учитывая тот факт, что пропускная способность определяет предельные возможности радиолинии, как в частотном, так и в энергетическом отношении, выражение (1) с учетом выражения (4) может быть уточнено:

$$C^k = \frac{1,2 \cdot R}{r \cdot \log_2 m} \cdot \log_2 \left[ 1 + \left( \frac{P_{i,j}^{НППИ}}{P_{ij}^u} \right)_{por} \right], \quad (6)$$

где  $\left( \frac{P_{i,j}^{НППИ}}{P_{ij}^u} \right)_{por}$  – пороговое отношение сигнал/шум, при котором возможна

синхронизация между передатчиком и приемником ВРЛ;  $C^k$  – классическая оценка пропускной способности радиолинии.

Учитывая (5), выражение (6) окончательно примет следующий вид:

$$C = \frac{1,2 \cdot R \cdot (1-p)^{V_k}}{r \cdot \log_2 m} \cdot \log_2 \left[ 1 + \left( \frac{P_{i,j}^{НППИ}}{P_{ij}^u} \right)_{por} \right], \quad (7)$$

где  $C$  – оценка пропускной способности радиолинии с учетом объема информационных кадров.

Величина  $\left( \frac{P_{i,j}^{НППИ}}{P_{ij}^u} \right)_{por}$  определяется вероятностью битовой ошибки

передачи  $p$  в соответствии с таблицами для порогового отношения сигнал/шум

[9] или по графикам кривых достоверности для разных методов помехоустойчивого кодирования [10].

Результаты исследований выражения (7) приведены на рис. 1 и рис. 2 для следующих параметров:  $V_k=1024$  байт;  $m=4$ ;  $R=150$  Мбит/с; вид помехоустойчивого кодирования – Витерби.

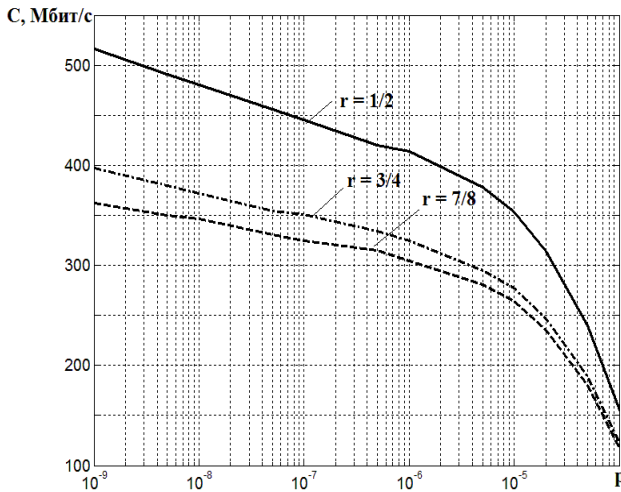


Рис. 1. Зависимость пропускной способности ВРЛ от вероятности битовой ошибки передаваемой информации при разных скоростях помехоустойчивого кодирования

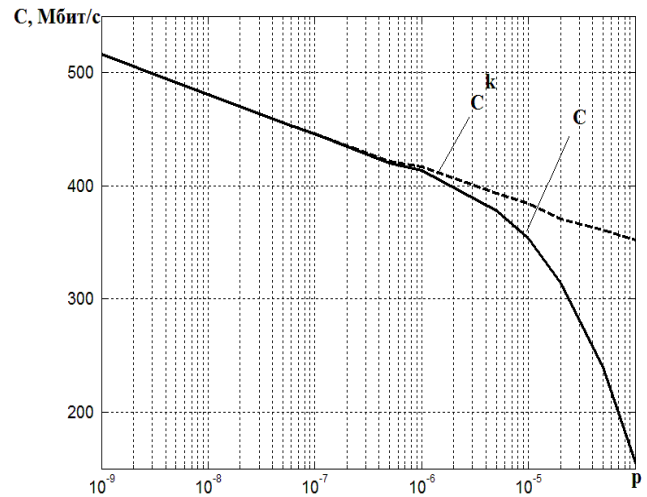


Рис. 2. Зависимость пропускной способности  $C^k$  и  $C$  от вероятности битовой ошибки передаваемой информации при скорости помехоустойчивого кодирования  $r=1/2$

### Оценка времени передачи информации на наземный пункт приема информации

Время передачи информации на наземный пункт приема является частным показателем оперативности доставки информации космической системы, который можно определить через объем информации  $j$ -го маршрута съемки для передачи на  $i$ -й НППИ и пропускной способностью радиолинии, используя выражение (6):

$$T_{i,j}^K = \frac{V_{i,j}}{C} = \frac{V_{i,j} \cdot r \cdot \log_2 m}{1,2 \cdot R \cdot \log_2 \left[ 1 + \left( \frac{P_{i,j}^{НППИ}}{P_{i,j}^{uu}} \right)_{por} \right]}, \quad (8)$$

где  $T_{i,j}^K$  - классическая оценка времени передачи информации по радиолинии;

$V_{i,j}$  - объем информации  $j$ -го маршрута съемки для передачи на  $i$ -й НППИ.

Величина  $V_{i,j}$  определяется скоростью бега изображения в фокальной плоскости телескопа и разрядностью аналого-цифрового преобразователя (АЦП) на выходе системы приёма и преобразования информации в соответствии со следующим выражением:

$$V_{i,j} = \frac{K \cdot L \cdot w \cdot q \cdot \tau_j}{\Delta \tau_x \cdot \Delta \tau_y}, \quad (9)$$

где  $K$ -скорость бега изображения в фокальной плоскости телескопа;  $L$ -длина фотозоны;  $w$ -разрядность АЦП;  $q$ -количество используемых фотозон целевой аппаратуры КА ДЗЗ;  $\Delta \tau_x$ ,  $\Delta \tau_y$  - размеры элемента ПЗС-матрицы вдоль направления полёта КА ДЗЗ и перпендикулярно направлению полёта КА ДЗЗ соответственно;  $\tau_j$  - длительность  $j$ -го маршрута съемки.

Учитывая (9), выражение (8) можно представить следующим образом:

$$T_{i,j}^K = \frac{V_{i,j}}{C} = \frac{K \cdot L \cdot w \cdot q \cdot \tau_j \cdot r \cdot \log_2 m}{1,2 \cdot R \cdot \Delta \tau_x \cdot \Delta \tau_y \cdot \log_2 \left[ 1 + \left( \frac{P_{i,j}^{НППИ}}{P_{i,j}^{uu}} \right)_{por} \right]}. \quad (10)$$

В связи с тем, что информация по радиолинии передается кадрами объемом  $V_k$  с вероятностью битовой ошибки передачи  $p$ , а также используя (7), выражение (10) примет следующий вид:

$$T_{i,j} = \frac{V_{i,j}}{C} = \frac{K \cdot L \cdot w \cdot q \cdot \tau_j \cdot r \cdot \log_2 m}{1,2 \cdot R \cdot \Delta \tau_x \cdot (1-p)^{V_k} \cdot \Delta \tau_y \cdot \log_2 \left[ 1 + \left( \frac{P_{i,j}^{НППИ}}{P_{i,j}^{uu}} \right)_{por} \right]}, \quad (11)$$

где  $T_{i,j}$  - оценка времени передачи информации по радиолинии с учетом объема информационных кадров.

Точность оценки  $\Delta T_{i,j}$  между величинами  $T_{i,j}^K$  и  $T_{i,j}$  можно определить следующим образом:

$$\Delta T_{i,j}(\%) = \left( \frac{T_{i,j} - T_{i,j}^K}{T_{i,j}} \right) \cdot 100. \quad (12)$$

Результаты исследований выражений (10), (11) и (12) приведены на рис. 3 и рис. 4 для следующих параметров:  $V_k=1024$  байт;  $R=150$  Мбит/с;  $m=4$ ;  $r=1/2$ ; вид помехоустойчивого кодирования – Витерби.

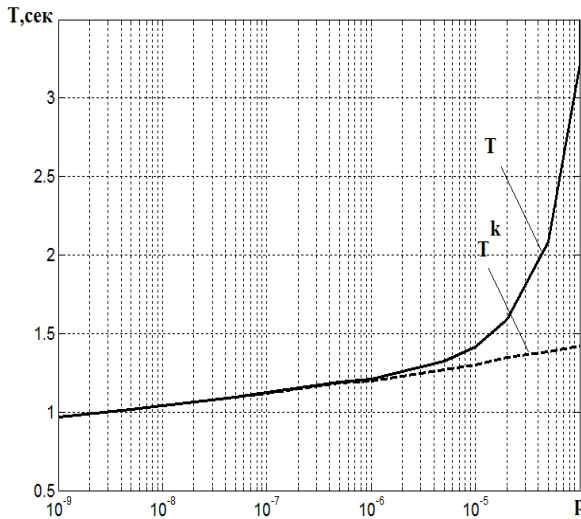


Рис. 3. Зависимость величин  $T_{i,j}^K$  и  $T_{i,j}$  от вероятности битовой ошибки передаваемой информации

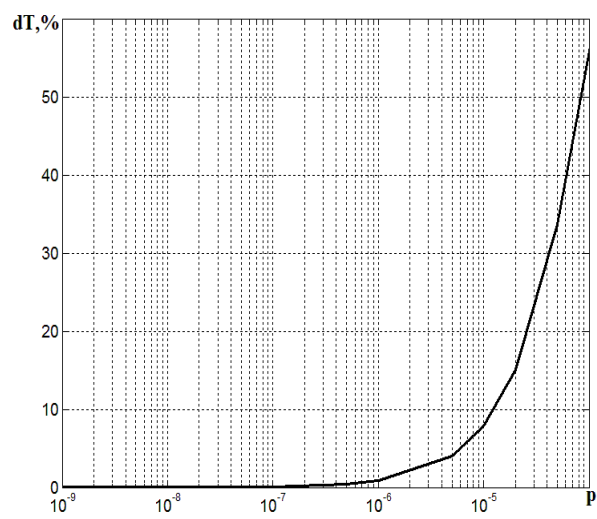


Рис. 4. Зависимость  $\Delta T_{i,j}$  от вероятности ошибки передаваемой информации

### Анализ результатов и выводы

Анализ графика на рис. 4 показывает, что в случае низконадежной радиолинии расчет времени передачи информации на НППИ по формуле (11) позволяет повысить точность ее оценки  $\Delta T_{i,j}$  до 60% относительно оценки классическим способом по формуле (10) в связи с ростом потерь канальных кадров.



Уменьшение оценки пропускной способности  $C$  по сравнению с оценкой классическим способом  $C^k$  при увеличении параметра  $p$  сопровождается ростом оценки оперативности  $T$  (рис.3).

В связи с изложенным выше целесообразно сделать вывод о том, что оценку времени передачи информации на наземный пункт приема в случае надежной радиолинии с одинаковым успехом можно осуществлять как по формуле (10), так и по формуле (11), и в случае ненадежной радиолинии – по формуле (11).

Таким образом в работе получено математическое выражение для оценки времени передачи информации на наземный пункт приема, учитывающее влияние объема канального кадра и обеспечивающее повышение точности оценки до 60% по сравнению с классическими способами.

Для уменьшения разницы в оценках  $\Delta T_{i,j}$  необходимо осуществлять разработку и применение эффективных методов помехоустойчивого кодирования в аппаратуре ВРЛ, обеспечивающих низкий уровень порогового отношения сигнал/шум.

### Литература

1. Куренков В.И., Салмин В.В., Абрамов Б.А. Основы устройства и моделирования целевого функционирования космических аппаратов наблюдения: учеб. пособие. – Самара: изд-во Самар. гос. аэрокосм. ун-та, 2006. 296 с.

2. Куренков В.И., Гоголев М.Ю. Методы исследования эффективности ракетно-космической техники: электрон. учеб. пособие. – Самара: изд-во Самар. гос. аэрокосм. ун-та, 2012. 285 с.

3. Ларин С.А., Кашеев А.А., Бутко А.В., Ефимов С.И. Оценка длительности сеансов связи космического аппарата с наземными пунктами приема информации // 17-я международная научно-техническая конференция "Проблемы передачи и обработки информации в сетях и системах

телекоммуникаций". Рязань: Рязанский государственный радиотехнический университет, 2012. С. 119-121.

4. Варакин Л.Е. Системы связи с шумоподобными сигналами. – М.: Радио и связь, 1985. 344 с.

5. Мордухович Л.Г., Степанов А.П. Системы радиосвязи: Курсовое проектирование. – М. Радио и связь, 1987. 192 с.

6. Спутниковая связь и вещание. Справочник / Под ред. Л.Я. Кантора.– М.: Радио и связь, 1997. 344с.

7. Мартин Дж. Системный анализ передачи данных. Том 2. – М., Мир, 1975. 432 с.

8. Мартьянов С.И. Минимизация среднего времени передачи сообщения по ненадежному каналу связи // Электросвязь.– 1995.– №7.– С. 10.

9. Камнев В.Е., Черкасов В.В, Чечин Г.В. Спутниковые сети связи. – М. Альпина Паблицер, 2004. 536 с.

10. CDM-600. Open Network Satellite Modem (2.4 Kbps-20 Mbps)/ Installation and Operation Manual for Firmware Version 2.0.1 or higher. – Comtech EF Data, 2005. 250 p.