

СИСТЕМНЫЙ ПОДХОД К ВЫБОРУ ПРОПУСКНОЙ СПОСОБНОСТИ ВЫСОКОСКОРОСТНОЙ РАДИОЛИНИИ ДЛЯ СОВРЕМЕННЫХ КОСМИЧЕСКИХ АППАРАТОВ ДИСТАНЦИОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ ЗЕМЛИ

© 2016 А. А. Кашеев

Филиал акционерного общества «Ракетно-космический центр «Прогресс» –
«Особое конструкторское бюро «Спектр», г. Рязань

В статье рассматриваются основные принципы выбора пропускной способности высокоскоростной радиолнии для современных космических аппаратов дистанционного зондирования Земли с учётом переполнения бортового запоминающего устройства; длительности сеансов связи космического аппарата с наземными пунктами приёма информации; необходимой ширины полосы пропускания и надёжности радиолнии. Получены математические ограничения для условий переполнения бортового запоминающего устройства целевой информации и величины объёма информации, передаваемой на наземные пункты приёма информации в течение сеанса связи космического аппарата с наземными пунктами приёма информации. На основе формулы Шеннона с учётом энергетических соотношений для линий спутниковой связи, необходимой ширины полосы пропускания и вероятности ошибки передачи информации предложено выражение для оценки пропускной способности радиолнии. Исследовано влияние вероятности ошибки передачи информации и основных параметров радиосигнала (скорость помехоустойчивого кодирования и индекс фазовой манипуляции сигнала) на величину пропускной способности высокоскоростной радиолнии. Проведён анализ изменения пропускной способности радиолнии в ретроспективе на ближайшие годы в соответствии с прогнозируемой величиной потребного объёма космической информации дистанционного зондирования Земли для разной надёжности радиолнии.

Пропускная способность, космические аппараты, бортовое запоминающее устройство целевой информации, зона радиовидимости, наземный пункт приёма информации.

Введение

На этапе разработки требований к аппаратуре специального назначения космических аппаратов дистанционного зондирования Земли (КА ДЗЗ) и проектирования высокоскоростных радиолний (ВРЛ) одной из важнейших задач является априорная оценка величины пропускной способности радиолнии, от объективности которой в дальнейшем зависят оперативность доставки информации космической системой и её целостность. Также, по мере развития группировки КА ДЗЗ, возникает необходимость в анализе изменения пропускной способности радиолнии в ретроспективе на ближайшие годы в соответствии с прогнозируемой величиной

потребного объёма космической информации ДЗЗ.

Решению данных задач посвящено множество работ, которые носят разрозненный характер и не учитывают в полной мере совокупность факторов, влияющих на величину пропускной способности ВРЛ. Целью настоящей работы является решение указанных задач.

Оценка пропускной способности высокоскоростной радиолнии

В процессе наблюдения земной поверхности КА ДЗЗ передача информации осуществляется при нахождении космического аппарата в зоне радиовидимости

Цитирование: Кашеев А.А. Системный подход к выбору пропускной способности высокоскоростной радиолнии для современных космических аппаратов дистанционного зондирования Земли // Вестник Самарского государственного аэрокосмического университета имени академика С.П. Королёва (национального исследовательского университета). 2016. Т. 15, № 1. С. 180-186. DOI: 10.18287/2412-7329-2016-15-1-180-186

наземного пункта приёма информации (НППИ), а за её пределами накопление информации происходит в бортовом запоминающем устройстве целевой информации (ЗУЦИ). Пропускная способность канала ВРЛ, как правило, определяется необходимой шириной полосы пропускания и надёжностью канала связи.

Поэтому выбор пропускной способности ВРЛ целесообразно осуществлять исходя из следующих условий: переполнения бортового ЗУЦИ; величины объёма информации, передаваемой на НППИ в течение сеанса связи КА ДЗЗ с НППИ; необходимой ширины полосы пропускания и вероятности ошибки передачи информации.

В первом случае максимальный объём информации, который может быть записан в ЗУЦИ с начала съёмки земной поверхности до момента входа КА в ЗРВ НППИ, не должен превышать остаточный объём бортового ЗУЦИ (рис. 1)

$$V_{\max} \leq V_{\text{ZUCIost}}, \quad (1)$$

где V_{\max} – максимальный объём информации, который может быть записан в ЗУЦИ с начала съёмки земной поверхности до момента входа КА в ЗРВ НППИ; V_{ZUCIost} – остаточный объём бортового ЗУЦИ к моменту входа КА ДЗЗ в зону радиовидимости НППИ.

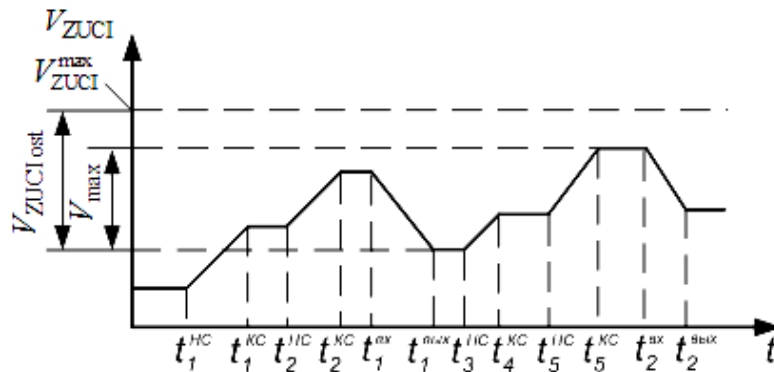


Рис. 1. График состояния ЗУЦИ

Во втором случае пропускная способность канала ВРЛ должна обеспечивать возможность передачи максимального объёма информации ДЗЗ за время сеанса связи КА с НППИ:

$$C \geq \max \left(\frac{\sum_{j=1}^M V_{i,j}}{\Delta T_i} \right), \quad i = \overline{1, \dots, N}. \quad (2)$$

Здесь C – пропускная способность канала связи ВРЛ; $V_{i,j}$ – объём информации j -го маршрута съёмки для передачи на i -й НППИ; ΔT_i – время сеанса связи КА ДЗЗ с i -м НППИ; N – количество НППИ; M – количество маршрутов съёмки, накоплен-

ных за период между соседними сеансами связи.

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

$$V_{i,j} = \frac{K \cdot L \cdot w \cdot q \cdot \tau_j}{\Delta \tau_x \cdot \Delta \tau_y}.$$

Здесь K – скорость бега изображения в фокальной плоскости телескопа; L – длина фотозоны; w – разрядность АЦП; q – количество используемых фотозон целе-

вой 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.

Величина ΔT_i из выражения (2) может быть рассчитана следующим образом [1]:

$$\Delta T_i = \begin{cases} t_i^{6blx} - t_i^{6x} & \text{при } t_i^{6blx} > t_i^{6x}, V_i = V_i^{6x} \text{ и } V_i = V_i^{6blx}, \\ (t_i^{6blx} - t_0) + (t_{01} - t_i^{6x}) & \text{при } t_i^{6blx} < t_i^{6x}, V_i = V_i^{6x} \text{ и } V_i = V_i^{6blx}, \\ t_i^{6blx} - t_0 & \text{при } V_i \neq V_i^{6x} \text{ и } V_i = V_i^{6blx}. \end{cases} \quad (3)$$

Здесь t_0 – начальное время пересечения восходящего узла орбиты (начало полёта КА); t_{01} – время пересечения восходящего узла орбиты в конце первого витка полёта КА; t_i^{6x} – время входа КА в зону ра-

диовидимости i -го НППИ; t_i^{6blx} – время выхода КА из зоны радиовидимости i -го НППИ.

С учётом (3) выражение для (2) примет следующий вид:

$$C \geq \max \begin{cases} \left(\frac{\sum_{j=1}^M V_{i,j}}{t_i^{6blx} - t_i^{6x}} \right) & \text{при } t_i^{6blx} > t_i^{6x}, V_i = V_i^{6x} \text{ и } V_i = V_i^{6blx}, \\ \left(\frac{\sum_{j=1}^M V_{i,j}}{(t_i^{6blx} - t_0) + (t_{01} - t_i^{6x})} \right) & \text{при } t_i^{6blx} < t_i^{6x}, V_i = V_i^{6x} \text{ и } V_i = V_i^{6blx}, \\ \left(\frac{\sum_{j=1}^M V_{i,j}}{(t_i^{6blx} - t_0)} \right) & \text{при } V_i \neq V_i^{6x} \text{ и } V_i = V_i^{6blx}. \end{cases} \quad (4)$$

В третьем случае, согласно формуле Шеннона [2], пропускная способность ВРЛ определяется необходимой шириной полосы пропускания передаваемой информации и отношением сигнал/шум на входе приёмного устройства:

$$C = \Delta f \cdot \log_2 \left[1 + \left(\frac{P_{i,j}^{НППИ}}{P_{i,j}^{ш}} \right) \right], \quad (5)$$

где Δf – ширина полосы пропускания приёмника ВРЛ; $P_{i,j}^{НППИ}$ – мощность полезного сигнала на входе приёмника ВРЛ

i -го НППИ в j -й момент времени; $P_{i,j}^{ш}$ – мощность шума на входе оборудования ВРЛ i -го НППИ.

Учитывая основные энергетические соотношения для линий спутниковой связи [3; 4], величину $P_{i,j}^{НППИ}$ определим как

$$P_{i,j}^{НППИ} = \frac{(c / f_u)^2 P^{КА} \eta^{КА} G_i^{КА} G_i^{НППИ} \eta_i^{НППИ}}{16\pi^2 D_{i,j}^2 L_{i,j}^{дон}}. \quad (6)$$

Здесь $D_{i,j} = \sqrt{(x_{i,j}^{tpsk})^2 + (y_{i,j}^{tpsk})^2 + (z_{i,j}^{tpsk})^2}$ – 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; $L_{i,j}^{don}$ – дополнительное затухание энергии радиосигнала между КА и i -м НППИ в j -й момент времени; G_i^{KA} и $G_i^{НППИ}$ – коэффициенты усиления антенны оборудования ВРЛ КА ДЗЗ на передачу и оборудования ВРЛ НППИ – на приём соответственно; η^{KA} и $\eta_i^{НППИ}$ – коэффициент передачи антенно-волноводного тракта оборудования ВРЛ КА и ВРЛ i -го НППИ соответственно; f_i^n – несущая частота радиосигнала ВРЛ КА с i -м НППИ; c – скорость света.

Мощность шума на входе оборудования ВРЛ i -го НППИ можно рассчитать по формуле [3]:

$$P_{i,j}^{uu} = kT_{i,j}^{\Sigma} \Delta f_u, \quad (7)$$

где k – постоянная Больцмана; $T_{i,j}^{\Sigma}$ – эквивалентная шумовая температура приёмной системы оборудования ВРЛ i -го НППИ в j -й момент времени с учётом внутренних и внешних шумов; Δf_u – эквивалентная (энергетическая) шумовая полоса приёмника.

Предполагается, что величина Δf_u соответствует ширине спектра передаваемого сигнала и ширине полосы пропускания ВРЛ [3]:

$$\Delta f_u \approx \Delta f \approx \frac{1,2 \cdot R}{r \cdot \log_2 m}, \quad (8)$$

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

Учитывая (6), (7) и (8), выражение для пропускной способности (5) представим следующим образом:

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

Поскольку пропускная способность определяет предельные возможности радиолинии как в частотном, так и в энергетическом отношении, то выражение (5) может быть уточнено:

$$C = \Delta f \cdot \log_2 \left[1 + \left(\frac{P_{i,j}^{НППИ}}{P_{i,j}^{uu}} \right)_{por} \right], \quad (9)$$

где $\left(\frac{P_{i,j}^{НППИ}}{P_{i,j}^{uu}} \right)_{por}$ – пороговое отношение

сигнал/шум, при котором возможна синхронизация между передатчиком и приёмником ВРЛ.

Пороговое отношение сигнал/шум определяет вероятность ошибки передачи информации по радиолинии, которая в соответствии с [5] имеет вид:

$$P_{osh} = \frac{2(1 - \frac{1}{\sqrt{m}})}{\log_2 \sqrt{m}} \cdot Q \left[\sqrt{\left(\frac{3 \log_2 \sqrt{m}}{m-2} \right) \frac{2E_b}{N_0}} \right]. \quad (10)$$

Здесь p_{osh} – вероятность ошибки передачи информации по радиолинии; $Q(x)$ – гауссов интеграл ошибок, который согласно [6] можно представить как:

$$Q(x) = \frac{1}{x\sqrt{2\pi}} \cdot \exp\left(-\frac{x^2}{2}\right). \quad (11)$$

С учётом (11) выражение (10) примет вид:

$$P_{osh} = \frac{2(1 - \frac{1}{\sqrt{m}})}{\log_2 \sqrt{m}} \cdot \frac{\exp\left[\left(\frac{3 \log_2 \sqrt{2\pi m}}{m-2}\right) \frac{E_b}{N_0}\right]}{\sqrt{\left(\frac{3 \log_2 \sqrt{2\pi m}}{m-2}\right) \frac{2E_b}{N_0}}}. \quad (12)$$

Таким образом, выбор пропускной способности высокоскоростной линии радиосвязи КА ДЗЗ осуществляется с учётом выражений (1), (4), (6).

Результаты расчётов согласно (9) с учётом (12) приведены на рис. 2, 3.

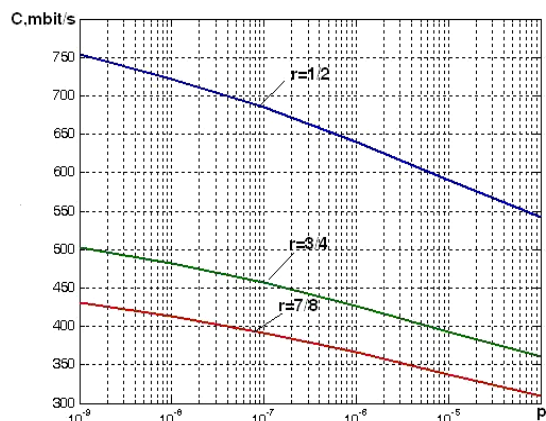


Рис. 2. Зависимость требуемой пропускной способности ВРЛ от достоверности передаваемой информации при ФМН-4

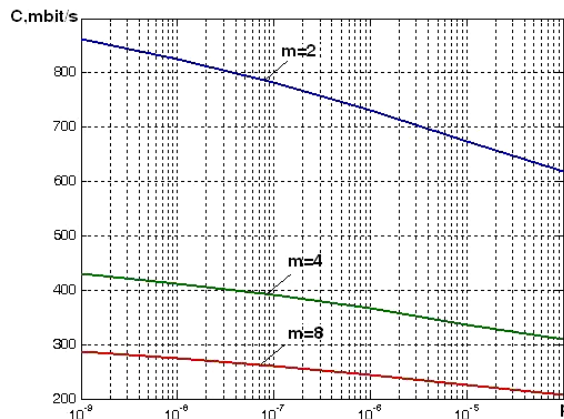


Рис. 3. Зависимость требуемой пропускной способности ВРЛ от достоверности передаваемой информации при скорости помехоустойчивого кодирования 7/8

Таблица 1. Распределение требуемой пропускной способности радиолинии по годам

C, Мбит/с	Годы						
	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021
$p=10^{-6}$	640,53	672,38	704,24	736,09	767,93	799,78	831,63
$p=10^{-7}$	685,15	719,22	753,30	787,36	821,43	855,51	889,57
$p=10^{-8}$	722,46	758,38	794,30	830,23	866,16	902,10	938,01
$p=10^{-9}$	753,69	791,17	828,65	866,12	903,60	941,08	978,56

Заключение

Проведённый анализ показывает, что для передачи космической информации ДЗЗ по каналам ВРЛ с надлежащим качеством в ближайшие годы необходима пропускная способность до 1 Гбит/с. Во исполнение указания президента РФ о импортозамещении обеспечить данное требование на отечественной элементной базе не представляется возможным. Одним из решений может являться умень-

шение требований к пропускной способности радиолинии, для чего рекомендуется осуществлять: разработку и применение эффективных методов помехоустойчивого кодирования в аппаратуре ВРЛ, обеспечивающих низкий уровень порогового отношения сигнал/шум (например, турбокоды); увеличение количества наземных пунктов приёма информации и объёма ЗУЦИ; применение экономичных методов фазовой модуляции сигнала.

Библиографический список

1. Ларин С.А., Кашеев А.А., Бутко А.В., Ефимов С.И. Оценка длительности сеансов связи космического аппарата с наземными пунктами приёма информации // Сборник тезисов 17-ой международной научно-технической конференции «Проблемы передачи и обработки информации в сетях и системах телекоммуникаций». Рязань: Рязанский государственный радиотехнический университет, 2012. С. 119-121.
2. Варакин Л.Е. Системы связи с шумоподобными сигналами. М.: Радио и связь, 1985. 344 с.
3. Мордухович Л.Г., Степанов А.П. Системы радиосвязи. Курсовое проектирование. М.: Радио и связь, 1987. 192 с.
4. Спутниковая связь и вещание. Справочник / под ред. Л.Я. Кантора. М.: Радио и связь, 1997. 344 с.
5. Песков С.Н., Ищенко А.Е. Расчёт вероятности ошибки в цифровых каналах связи // Теле-Спутник. 2010. № 11 (181). С. 70-75.

Информация об авторе

Кашеев Алексей Анатольевич, кандидат технических наук, начальник сектора, филиал АО «РКЦ «Прогресс» – «ОКБ «Спектр», г. Рязань. E-mail: alexei_k1@mail.ru. Область научных интересов: моделирование и оптимальное проектирование систем спутниковой связи; защищённые системы связи; цифровая обработка сигналов; системы спутниковой навигации; математическое моделирование основных узлов космических комплексов дистанционного зондирования Земли.

SYSTEM APPROACH TO THE CHOICE OF CAPACITY OF A HIGH-SPEED RADIO DATA LINK FOR MODERN EARTH REMOTE SENSING SPACECRAFT

© 2016 A. A. Kascheev

Branch of the Joint Stock Company
«Space Rocket Center «Progress» – «Specialist Design Office «Spectrum»,
Ryazan, Russian Federation

The main principles of choosing the capacity of a high-speed radio data link for modern Earth remote sensing spacecraft are discussed in the paper. The following points are taken into account: overfilling of the onboard memory storage device; duration of communication sessions between the spacecraft and the downlink point; the required bandwidth and the reliability of the radio data link. Mathematical restrictions for the conditions of the overflow of the on-board memory storage of target information and the amount of information transmitted to the downlink points during a communication session between the spacecraft and the downlink point are specified. An expression is proposed for the estimation of radio data link capacity on the basis of the Shannon formula with account for the energy relations for satellite communication links, the required width of the passband and the probability of data transmission error. The influence of the probability of the information transmission error and the main parameters of the radio signal (the speed of protective coding and the phase deviation) on the value of high-speed radio data link capacity is analyzed. Changes in radio data link capacity in retrospect for the years immediately ahead are analyzed in accordance with the predicted value of the required volume of space information of Earth remote sensing for radio data links of different reliability.

Line capacity, spacecraft, on-board device of target information storage, signal acquisition zone, downlink point of information reception.

Citation: Kascheev A.A. System approach to the choice of capacity of a high-speed radio data link for modern earth remote sensing spacecraft. *Vestnik of the Samara State Aerospace University*. 2016. V. 15, no. 1. P. 180-186. DOI: 10.18287/2412-7329-2016-15-1-180-186

References

1. Larin S.A., Kascheev A.A., Butko A.V., Efimov S.I. Otsenka dlitel'nosti seansov svyazi kosmicheskogo apparata s nazemnymi punktami priema informatsii. *17-ya mezhdunarodnaya nauchno-tekhnicheskaya konferentsiya «Problemy peredachi i obrabotki informatsii v setyakh i sistemakh telekommunikatsiy»*. Ryazan: Ryazan state Radio Engineering University Publ., 2012. P. 119-121. (In Russ.)
2. Varakin L.E. *Sistemy svyazi s shumopodobnymi signalami* [Communication systems with noise-like signals]. M.: Radio i Svyaz' Publ., 1985. 344 p.
3. Morduhovich L.G., Stepanov A.P. *Sistemy radiosvyazi. Kursovoe proektirovanie* Radio communication systems: Course designing]. Moscow: Radio i Svyaz' Publ., 1987. 192 p.
4. *Sputnikovaya svyaz' i veshchanie. Spravochnik* [Satellite communication and broadcasting. Reference book / ed. by L. Ya. Kantor]. Moscow: Radio i Svyaz' Publ., 1997. 344 p.
5. Peskov S.N., Ischenko A.E. Calculation to probability of the mistake in digital channel relationship. *Tele-Sputnik*. 2010. No. 11 (181). P. 70-75. (In Russ.)

About the author

Kascheev Aleksey Anatolievich, Candidate of Science (Engineering), Head of Sector, branch of the Joint Stock Company «Space Rocket Center «Progress» – «Specialist Design Office Spectrum», Ryazan, Russian Federation. E-mail: alexei_k1@mail.ru. Area of Research: modeling and optimal design of space communication systems, protection of communication systems, digital processing of signals, satellite navigation systems, mathematical modeling of the main components of Earth remote sensing space complexes.