

Повышение точности оценки длительности сеансов связи космических аппаратов дистанционного зондирования Земли с наземными пунктами приёма информации для надёжных высокоскоростных радиолиний

А. А. Кашеев, В. В. Миронов

*Рязанский государственный радиотехнический университет
Рязань, 390005, Россия*

E-mails: alexeikaa81@yandex.ru, mironov1.v.v@rsreu.ru

Рассматривается задача оценки длительности сеансов связи космических аппаратов с наземными пунктами приёма информации при дистанционном зондировании Земли, учитывающая надёжность высокоскоростной радиолинии. Задача решается в предположении, что в процессе наблюдения земной поверхности передача информации осуществляется при нахождении космического аппарата в зоне радиовидимости пункта приёма, а за её пределами накопление информации происходит в бортовом запоминающем устройстве.

Предложен способ расчёта географических координат границ зон радиовидимости наземных пунктов приёма информации на основе оценки текущего отношения сигнал/шум на входе приёмника высокоскоростной радиолинии и сравнении её с пороговым отношением сигнал/шум при разной вероятности битовой ошибки передачи информации. Получено тематическое выражение для оценки длительности сеансов связи космических аппаратов с наземными пунктами приёма информации, учитывающее: вероятность битовой ошибки передачи информации по высокоскоростной радиолинии; объём бортового запоминающего устройства; параметры радиосигнала (метод и скорость помехоустойчивого кодирования, вид и индекс фазовой манипуляции сигнала). Исследовано влияние вероятности битовой ошибки передачи информации на длительность сеансов связи космических аппаратов с пунктами приёма и точность её оценки. Приведены рекомендации по оценке длительности сеансов связи космических аппаратов с наземными пунктами приёма информации для ненадёжных и высоконадёжных радиолиний.

Ключевые слова: зоны радиовидимости, космические аппараты дистанционного зондирования Земли, наземные пункты приёма информации, высокоскоростные радиолинии, длительность сеансов связи, бортовая аппаратура, наземная аппаратура, бортовое запоминающее устройство, помехоустойчивое кодирование

Одобрена к печати: 12.10.2018

DOI: 10.21046/2070-7401-2018-15-6-235-244

Введение

В процессе штатной эксплуатации космических аппаратов дистанционного зондирования Земли (КА ДЗЗ) одной из актуальных задач является априорная оценка длительности сеансов связи космических аппаратов с наземными пунктами приёма информации (НППИ), от объективности которой зависят точность планирования работы бортовой аппаратуры высокоскоростной радиолинии (ВРЛ) и достоверность подтверждения тактико-технических характеристик системы. Также точность планирования работы бортовой аппаратуры существенным образом влияет на качество создания тематических продуктов и технологий построения информационных систем дистанционного мониторинга, подробно рассмотренных в работе (Лупян и др., 2015).

Оценка длительности сеансов связи КА ДЗЗ с НППИ осуществляется путём расчёта границ зон радиовидимости (ЗРВ) пунктов приёма. Получивший широкое распространение классический подход к построению ЗРВ на основе расчёта центрального угла Земли исходя из условий прямой видимости (Куренков и др., 2006) обеспечивает необходимую точность для ненадёжных радиолиний и является неприемлемым для радиолиний с высокой степенью надёжности.

С целью решения указанной проблемы в работе предлагается способ построения ЗРВ на основе оценки текущего отношения сигнал/шум на входе приёмника НППИ и сравнения её с пороговым отношением сигнал/шум для разной вероятности битовой ошибки передачи информации, определяющей надёжность радиолинии.

Постановка задачи

Целью работы является оценка длительности сеансов связи КА ДЗЗ с НППИ по ВРЛ с учётом вероятности битовой ошибки передаваемой информации.

Модель высокоскоростной радиолинии предполагает следующее: радиолиния организуется с помощью наземной аппаратуры (НА) ВРЛ, расположенной на НППИ с географическими координатами $(\lambda_i^{nppi}, \varphi_i^{nppi})$, и бортовой аппаратуры (БА) ВРЛ, устанавливаемой на КА ДЗЗ с линейными координатами движения центра масс в инерциальной системе координат $x_{i,j}^{isk}, y_{i,j}^{isk}$ и $z_{i,j}^{isk}$.

На вход БА ВРЛ поступают данные маршрутов съёмки земной поверхности в цифровой форме объёмом $V_{i,j}$, которые затем подвергаются помехоустойчивому кодированию по методу Витерби со скоростью r с записью в бортовое запоминающее устройство (БЗУ) объёмом V_i^{bzu} , фазовой манипуляции с индексом m и передаче на наземную аппаратуру ВРЛ.

Алгоритм оценки длительности сеансов связи

В процессе наблюдения земной поверхности КА ДЗЗ передача информации осуществляется при нахождении космического аппарата в ЗРВ НППИ, а за её пределами накопление информации происходит в бортовом запоминающем устройстве.

Длительность сеансов связи КА ДЗЗ с НППИ определяется, с одной стороны, шириной зоны радиовидимости НППИ, и с другой — текущим состоянием БЗУ КА ДЗЗ.

Для расчёта длительности сеансов связи КА ДЗЗ с НППИ в настоящей статье предлагается приведённый ниже алгоритм (рис. 1, см. с. 237).

Вычисление текущих линейных координат движения центра масс КА в топоцентрической системе координат осуществляется следующим образом (Машбиц, 1982):

$$\begin{pmatrix} x_{i,j}^{tpsk} \\ y_{i,j}^{tpsk} \\ z_{i,j}^{tpsk} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos \varphi_i^{nppi} \sin \lambda_i^{nppi} & \sin \varphi_i^{nppi} \sin \lambda_i^{nppi} & -\cos \lambda_i^{nppi} \\ -\sin \varphi_i^{nppi} & \cos \varphi_i^{nppi} & 0 \\ \cos \varphi_i^{nppi} \cos \lambda_i^{nppi} & \sin \varphi_i^{nppi} \cos \lambda_i^{nppi} & \sin \lambda_i^{nppi} \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} x_j^{gsk} - x_i^{gsk nppi} \\ y_j^{gsk} - y_i^{gsk nppi} \\ z_j^{gsk} - z_i^{gsk nppi} \end{pmatrix},$$

где $x_{i,j}^{tpsk}, y_{i,j}^{tpsk}$ и $z_{i,j}^{tpsk}$ — линейные координаты движения центра масс КА ДЗЗ в топоцентрической системе координат в j -й момент времени, связанной с i -м НППИ; $x_i^{gsk nppi}, y_i^{gsk nppi}$ и $z_i^{gsk nppi}$ — линейные координаты местоположения i -го НППИ в геодезической системе координат; x_j^{gsk}, y_j^{gsk} и z_j^{gsk} — линейные координаты движения центра масс КА ДЗЗ в гринвичской системе координат в j -й момент времени.

Линейные координаты местоположения i -го НППИ в геодезической системе координат рассчитываются следующим образом (Урмаев, 1989):

$$x_i^{gsk nppi} = (N_i + h_i) \cdot \cos \varphi_i^{nppi} \cdot \cos \lambda_i^{nppi}; \quad y_i^{gsk nppi} = (N_i + h_i) \cdot \cos \varphi_i^{nppi} \cdot \sin \lambda_i^{nppi};$$

$$z_i^{gsk nppi} = \left[(1 - e_3^2) N_i + h_i \right] \cdot \sin \varphi_i^{nppi},$$

где $N_i = R_e / (1 - e_3^2 \cdot \sin^2 \varphi_i^{nppi})^{1/2}$.

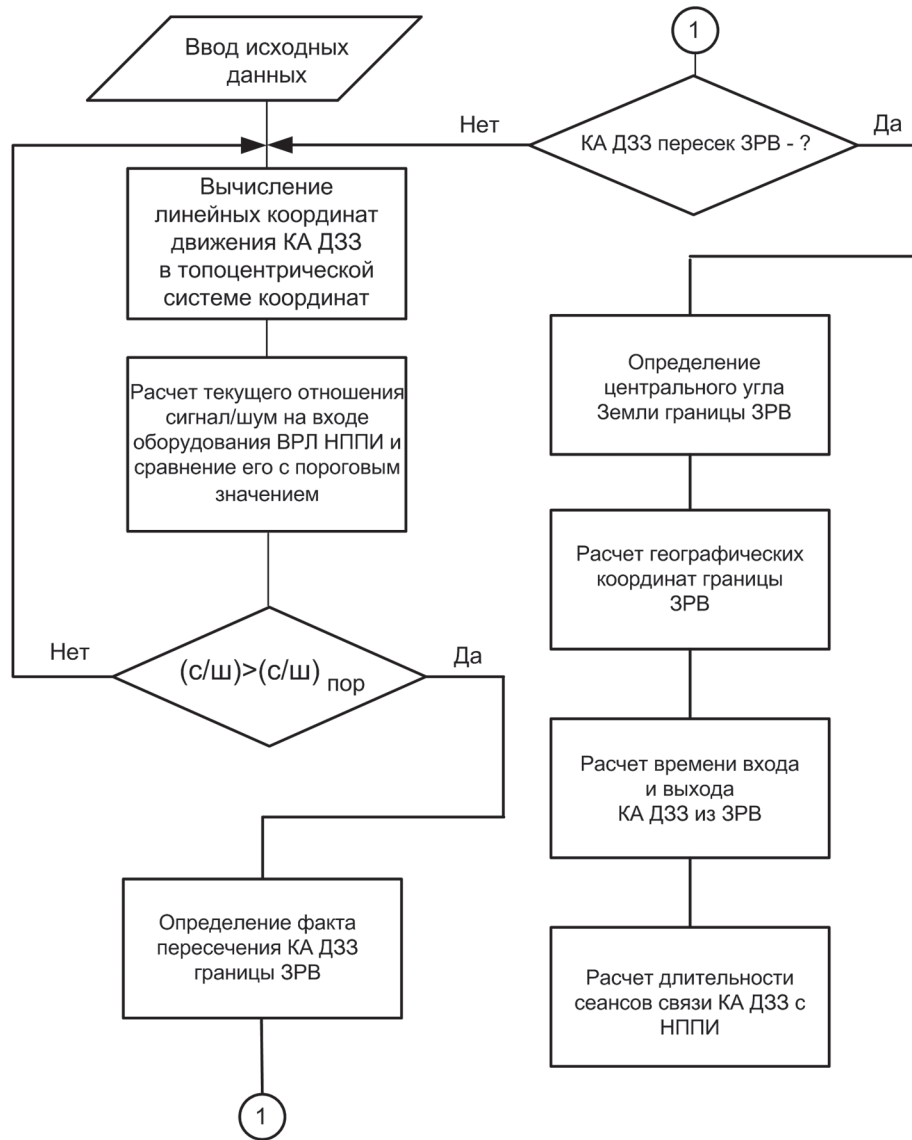


Рис. 1. Алгоритм оценки длительности сеанса связи НППИ с КА ДЗЗ

Линейные координаты движения центра масс КА ДЗЗ в гринвичской системе координат в j -й момент времени могут быть рассчитаны в соответствии с работой (Куренков и др., 2006) как:

$$x_j^{gsk} = r_j \cos\left(\arctg\left[\left[1 - e_3^2\right] \cdot \operatorname{tg} \varphi_j^{sp}\right]\right) \cdot \cos \lambda_j^{sp};$$

$$y_j^{gsk} = r_j \cos\left(\arctg\left[\left[1 - e_3^2\right] \cdot \operatorname{tg} \varphi_j^{sp}\right]\right) \cdot \sin \lambda_j^{sp};$$

$$z_j^{gsk} = r_j \sin\left(\arctg\left[\left[1 - e_3^2\right] \cdot \operatorname{tg} \varphi_j^{sp}\right]\right),$$

где $r_j = \sqrt{(x_j^{isk})^2 + (y_j^{isk})^2 + (z_j^{isk})^2}$ — радиус-вектор центра масс КА ДЗЗ в j -й момент времени в инерциальной системе координат; λ_j^{sp} и φ_j^{sp} — географические долгота и широта подспутниковой точки КА ДЗЗ в j -й момент времени соответственно.

Расчёт текущего отношения сигнал/шум на входе приёмника НА ВРЛ осуществляется на основании расчётов мощности полезного сигнала и мощности шума на входе каналообразующего оборудования НППИ.

Расчёт мощности полезного сигнала на входе каналообразующего оборудования НППИ в соответствии с работой (Кашеев, 2016а, б) осуществляется как:

$$P_{i,j}^{\text{НППИ}} = \frac{P^{\text{КА}} \eta_i^{\text{КА}} G_i^{\text{КА}} G_i^{\text{НППИ}} \eta_i^{\text{НППИ}}}{L_i^0 L_i^{\text{доп}}} = \frac{\lambda^2 \eta_i^{\text{КА}} G_i^{\text{КА}} G_i^{\text{НППИ}} \eta_i^{\text{НППИ}}}{16\pi^2 D_{i,j}^2 L_i^{\text{доп}}} = \frac{(c/f_n)^2 P^{\text{КА}} \eta_i^{\text{КА}} G_i^{\text{КА}} G_i^{\text{НППИ}} \eta_i^{\text{НППИ}}}{16\pi^2 D_{i,j}^2 L_{i,j}^{\text{доп}}}, \tag{1}$$

где $D_{i,j} = \sqrt{(x_{i,j}^{\text{tpsk}})^2 + (y_{i,j}^{\text{tpsk}})^2 + (z_{i,j}^{\text{tpsk}})^2}$ — дальность от КА до i -го НППИ; $L_{i,j}^0$ и $L_{i,j}^{\text{доп}}$ — затухание энергии радиосигнала в свободном пространстве и дополнительное затухание энергии радиосигнала между КА и i -м НППИ в j -й момент времени соответственно; $G_i^{\text{КА}}$ и $G_i^{\text{НППИ}}$ — коэффициенты усиления антенны оборудования ВРЛ КА на передачу и оборудования ВРЛ НППИ на приём соответственно; $\eta_i^{\text{КА}}$ и $\eta_i^{\text{НППИ}}$ — коэффициенты передачи антенно-волноводного тракта оборудования ВРЛ КА и ВРЛ i -го НППИ; f_n^{H} — несущая частота радиосигнала ВРЛ КА с i -м НППИ; $c \approx 3 \cdot 10^8$ м/с — скорость света.

Мощность шума на входе оборудования ВРЛ i -го НППИ можно рассчитать по формуле (Кашеев, 2016а, б):

$$P_{i,j}^{\text{ш}} = k T_{i,j}^{\Sigma} \Delta f_{\text{ш}}, \tag{2}$$

где $k = 1,38 \cdot 10^{-23}$ Вт/Гц·град — 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; $\Delta f_{\text{ш}}$ — эквивалентная (энергетическая) шумовая полоса приёмника.

Эквивалентная (энергетическая) шумовая полоса приёмника $\Delta f_{\text{ш}}$ пропорциональна ширине спектра сигнала и может быть определена как (Кашеев, 2016а, б):

$$\Delta f_{\text{ш}} = \frac{1,2R}{r \cdot \log_2 m}, \tag{3}$$

где R — скорость передачи информации по каналу ВРЛ; r — скорость помехоустойчивого кодирования; m — кратность фазовой манипуляции сигнала.

Учитывая выражения (1)–(3), отношение сигнал/шум на входе приёмника НА ВРЛ $q_{i,j}$ можно представить как:

$$q_{i,j} = \left(\frac{P_{i,j}^{\text{НППИ}}}{P_{i,j}^{\text{ш}}} \right) = \frac{r \cdot \log_2 m \cdot (c/f_n)^2 \eta_i^{\text{КА}} P^{\text{КА}} G_i^{\text{КА}} G_i^{\text{НППИ}} \eta_i^{\text{НППИ}}}{16\pi^2 D_{i,j}^2 L_{i,j}^{\text{доп}} k \times 1,2 R T_{i,j}^{\Sigma}}.$$

Наличие КА в ЗРВ определяется путём сравнения значений величин $q_{i,j}$ и порогового отношения сигнал/шум $q_{\text{пор}}$ в соответствии со следующим условием:

$$\xi_{i,j} = \begin{cases} 1, & \text{при } q_{i,j} \geq q_{\text{пор}}, \\ 0, & \text{при } q_{i,j} < q_{\text{пор}}, \end{cases} \tag{4}$$

где $\xi_{i,j}$ — признак наличия КА в ЗРВ i -го НППИ в j -й момент времени. При $\xi_{i,j} = 1$ КА находится в ЗРВ i -го НППИ в j -й момент времени, при $\xi_{i,j} = 0$ КА не находится в ЗРВ i -го НППИ в j -й момент времени.

Величина $q_{\text{пор}}$ определяется вероятностью битовой ошибки передачи p в соответствии с таблицами для порогового отношения сигнал/шум (Камнев и др., 2004) для разных методов помехоустойчивого кодирования, рассмотренных в работах (Hagenaver, Hoher, 1989; Ruyndiah, 1998; Viterbi, 1967), или по графикам кривых достоверности передачи информации.

Определение факта пересечения КА границы ЗРВ i -го НППИ. Как было отмечено ранее, КА находится в ЗРВ i -го НППИ при $\xi_{i,j} = 1$ в соответствии с условием (4).

Для определения факта пересечения КА границы ЗРВ i -го НППИ в j -й момент времени необходимо выполнение следующего условия:

$$\Delta q_{i,j} \cdot \Delta q_{i,j-1} < 0,$$

где $\Delta q_{i,j} = q_{i,j} - q_{\text{пор}} = \left(P_{i,j}^{\text{НППИ}} / P_{i,j}^{\text{ш}} \right) - q_{\text{пор}}$ — разность между текущим значением отношения сигнал/шум на входе приёмника ВРЛ i -го НППИ в j -й момент времени и пороговым значением отношения сигнал/шум $q_{\text{пор}}$; $\Delta q_{i,j-1} = q_{i,j-1} - q_{\text{пор}} = \left(P_{i,j-1}^{\text{НППИ}} / P_{i,j-1}^{\text{ш}} \right) - q_{\text{пор}}$ — разность между предыдущим значением отношения сигнал/шум на входе приёмника ВРЛ i -го НППИ в $(j-1)$ -й момент времени и пороговым значением отношения сигнал/шум $q_{\text{пор}}$.

Таким образом, факт пересечения КА границы ЗРВ i -го НППИ можно представить в следующем виде:

$$\psi_{i,j} = \begin{cases} 1, & \Delta q_{i,j} \cdot \Delta q_{i,j-1} < 0 \text{ и } \xi_{i,j} = 1, \\ 0, & \text{в других случаях,} \end{cases}$$

где $\psi_{i,j}$ — признак пересечения границы ЗРВ КА i -го НППИ ($\psi_{i,j} = 1$ — зона радиовидимости пересечена КА, $\psi_{i,j} = 0$ — зона радиовидимости не пересечена КА).

Факт входа КА в ЗРВ i -го НППИ и факта выхода из ЗРВ i -го НППИ определяется в соответствии со следующим условием:

$$\chi_i = \begin{cases} \chi_i^{\text{вх}}, & \text{при } \Delta q_{i,j} > \Delta q_{i,j-1} \text{ и } \psi_{i,j} = 1, \\ \chi_i^{\text{вых}}, & \text{при } \Delta q_{i,j} < \Delta q_{i,j-1} \text{ и } \psi_{i,j} = 1, \end{cases} \quad (5)$$

где $\chi_i^{\text{вх}}$ — факт входа КА в ЗРВ i -го НППИ; $\chi_i^{\text{вых}}$ — факт выхода КА из ЗРВ i -го НППИ.

Для расчёта центрального угла Земли границы ЗРВ i -го НППИ необходимо оценить минимальный угол превышения над горизонтом γ_i^0 для каждого НППИ.

В соответствии с классическим способом построения ЗРВ (Куренков и др., 2006) центральный угол Земли рассчитывается с учётом γ_i^0 , обеспечивающего условия прямой видимости для i -го НППИ:

$$\zeta_i^0 = \arcsin \left[-\frac{\text{tg} \gamma_i^0 \cdot R_z}{(1 + \text{tg}^2 \gamma_i^0) \cdot (R_z + H_i^{\text{sp}})} + \sqrt{\left(\frac{\text{tg} \gamma_{i,j}^0 \cdot R_z}{(1 + \text{tg}^2 \gamma_i^0) \cdot (R_z + H_i^{\text{sp}})} \right)^2 + \frac{1}{(1 + \text{tg}^2 \gamma_i^0)} \cdot \left(1 - \frac{R_z^2}{(R_z + H_i^{\text{sp}})^2} \right)} \right],$$

где R_z — средний радиус Земли; H_i^{sp} — высота орбиты КА над поверхностью Земли для i -го НППИ на границе ЗРВ.

Однако такой подход не учитывает надёжность ВРЛ, что, в свою очередь, приводит к неточности определения длительности сеансов связи КА ДЗЗ с НППИ. Для устранения указанного недостатка предлагается рассчитывать минимальный угол превышения над горизонтом γ_i^0 на границе ЗРВ в момент входа КА в ЗРВ i -го НППИ, определяемой на основе оценки текущего отношения сигнал/шум на входе приёмника НППИ и сравнения её с пороговым отношением сигнал/шум при разной вероятности битовой ошибки передачи информации:

$$\gamma_i^0 = \arcsin \left(\frac{z_{i,J}^{\text{tpsk}}}{\sqrt{(x_{i,J}^{\text{tpsk}})^2 + (y_{i,J}^{\text{tpsk}})^2 + (z_{i,J}^{\text{tpsk}})^2}} \right), \quad (6)$$

где $x_{i,J}^{\text{tpsk}}$, $y_{i,J}^{\text{tpsk}}$, и $z_{i,J}^{\text{tpsk}}$ — линейные координаты движения центра масс КА в топоцентрической системе координат в J -й момент времени входа КА в ЗРВ i -го НППИ.

Расчёт географических координат границы ЗРВ для i -го НППИ осуществляется как (Куренков и др., 2006):

$$\varphi_i^0 = \arcsin\left(\cos \zeta_i^0 \cdot \sin \varphi_i^{nppi} - \sin \zeta_i^0 \cdot \cos \varphi_i^{nppi} \cdot \sin \xi\right), \tag{7}$$

$$\lambda_i^0 = \begin{cases} \arcsin(\sin \lambda_i^0), & \text{при } \sin \lambda_i^0 > 0 \text{ и } \cos \lambda_i^0 > 0, \\ 180^\circ - \arcsin(\sin \lambda_i^0), & \text{при } \sin \lambda_i^0 > 0 \text{ и } \cos \lambda_i^0 < 0, \\ \arcsin(\sin \lambda_i^0), & \text{при } \sin \lambda_i^0 < 0 \text{ и } \cos \lambda_i^0 > 0, \\ 180^\circ - \arcsin(\sin \lambda_i^0), & \text{при } \sin \lambda_i^0 < 0 \text{ и } \cos \lambda_i^0 < 0, \end{cases} \tag{8}$$

где φ_i^0 и λ_i^0 — географические широта и долгота границы зоны радиовидимости для i -го НППИ; φ_i^{nppi} — географическая широта i -го НППИ; $\xi = [0...2\pi]$ — вспомогательный угол, используемый для построения ЗРВ.

Центральный угол Земли ζ_i^0 в уравнении (7) рассчитывается по ранее приведённой формуле с учётом формулы (6).

Расчёт $\sin \lambda_i^0$ и $\cos \lambda_i^0$ в выражении (8) осуществляется в соответствии с формулами, приведёнными в работах (Куренков и др., 2006).

Результаты исследований выражений (7) и (8) при разных значениях вероятности битовой ошибки передачи информации приведены на рис. 2 при следующих параметрах: $\varphi_i^{nppi} = 37^\circ$ с.ш.; $\lambda_i^{nppi} = 56^\circ$ в.д.; $m = 4$; $r = 1/2$; $G_i^{НППИ} = G_i^{КА} = 25$ дБ; $P^{КА} = 10$ Вт; вид помехоустойчивого кодирования — Витерби.

Для определения длительности сеансов связи КА с НППИ необходимо, используя условие (5), определить время входа КА в ЗРВ и время выхода КА из ЗРВ как:

$$t_i = \begin{cases} t_i^{BX} = J \cdot \Delta t, & \text{при } \chi_i = \chi_i^{BX}, \\ t_i^{ВЫХ} = \tilde{J} \cdot \Delta t, & \text{при } \chi_i = \chi_i^{ВЫХ}, \end{cases} \tag{9}$$

где t_i^{BX} — время входа КА в ЗРВ i -го НППИ; $t_i^{ВЫХ}$ — время выхода КА из ЗРВ i -го НППИ; Δt — шаг измерения времени бортовым координатно-временным устройством; J и \tilde{J} — моменты времени входа и выхода КА из ЗРВ i -го НППИ соответственно.

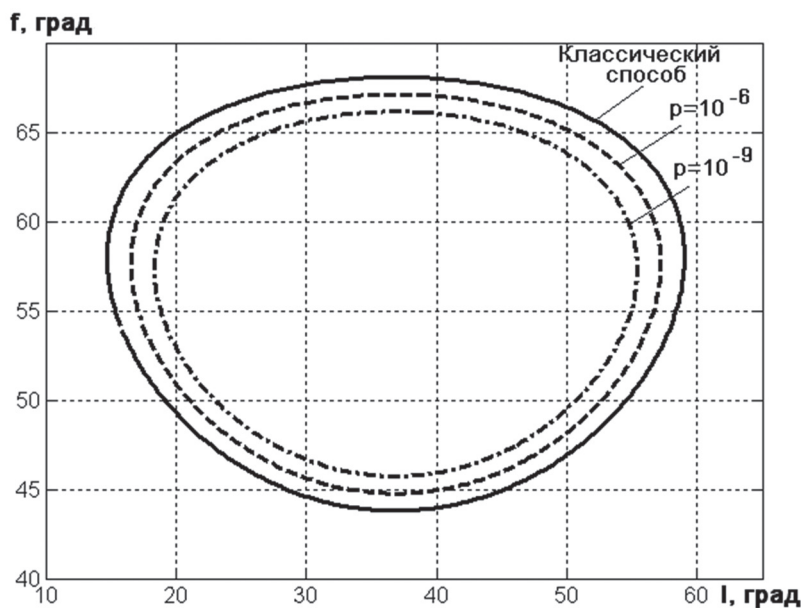


Рис. 2. Зоны радиовидимости НППИ для разных значений p

Учитывая выражение (9), длительность сеанса связи КА с i -м НППИ можно определить следующим образом:

$$\Delta T_i = \begin{cases} t_i^{\text{ВЫХ}} - t_i^{\text{ВХ}}, & \text{при } t_i^{\text{ВЫХ}} > t_i^{\text{ВХ}}, \chi_i \in (\chi_i^{\text{ВХ}}, \chi_i^{\text{ВЫХ}}), \\ (t_i^{\text{ВЫХ}} - t_0) + (t_{01} - t_i^{\text{ВХ}}), & \text{при } t_i^{\text{ВЫХ}} < t_i^{\text{ВХ}}, \chi_i \in (\chi_i^{\text{ВХ}}, \chi_i^{\text{ВЫХ}}), \\ t_i^{\text{ВЫХ}} - t_0, & \text{при } \chi_i \notin \chi_i^{\text{ВХ}} \text{ и } \chi_i \in \chi_i^{\text{ВЫХ}}, \\ \frac{V_i^{\text{BZU}}}{R_i}, & \text{при } \Delta T_i^{\text{BZU}} < \Delta T_i, \end{cases} \quad (10)$$

где t_0 — начальное время пересечения восходящего узла орбиты (начало полёта КА ДЗЗ); t_{01} — время пересечения восходящего узла орбиты в конце первого витка полёта КА ДЗЗ; V_i^{BZU} — текущий объём БЗУ КА ДЗЗ при сеансе связи с i -м НППИ; ΔT_i^{BZU} — длительность передачи полного объёма информации, находящегося в БЗУ КА ДЗЗ; R_i — скорость передачи информации на i -й НППИ.

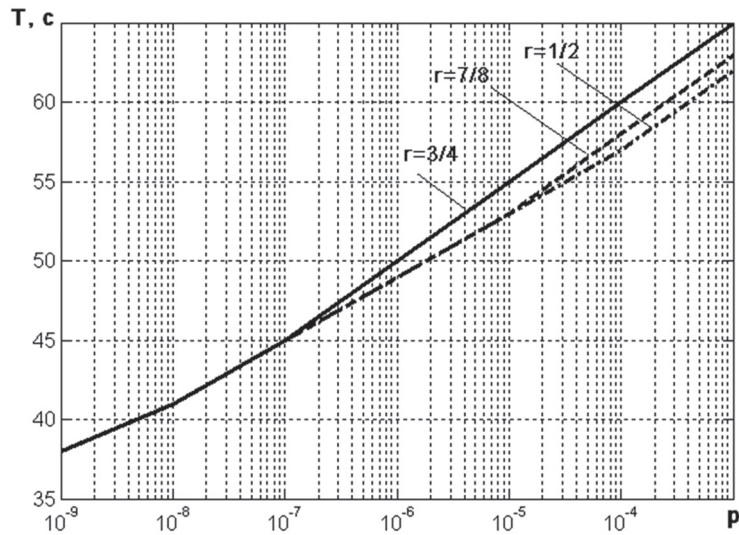


Рис. 3. Зависимость величины ΔT_i от вероятности битовой ошибки передаваемой информации при разных значениях r

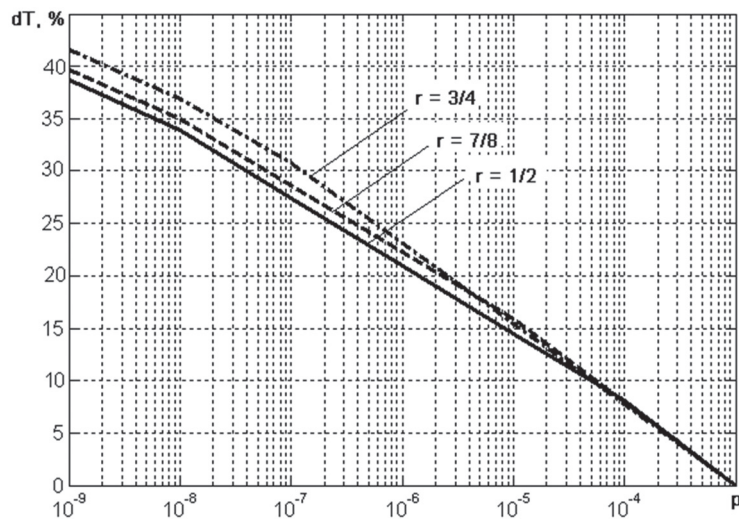


Рис. 4. Зависимость dT_i от вероятности ошибки передаваемой информации при разных значениях r

Точность оценки dT_i длительности сеанса связи КА ДЗЗ с i -м НППИ классическим способом и по формуле (10) можно определить следующим образом:

$$dT_i(\%) = \left| \frac{\Delta T_i^k - \Delta T_i}{\Delta T_i^k} \right| \times 100, \quad (11)$$

где dT_i — точность оценки длительности сеанса связи КА ДЗЗ с i -м НППИ; ΔT_i^k — оценка длительности сеанса связи КА ДЗЗ с i -м НППИ классическим способом.

Результаты исследований выражений (10) и (11) приведены на *рис. 3* и *4* (см. с. 241) при следующих параметрах: $\varphi_i^{nppi} = 37^\circ$ с.ш.; $\lambda_i^{nppi} = 56^\circ$ в.д.; $m = 4$; $G_i^{nppi} = G_i^{KA} = 25$ дБ; $P^{KA} = 10$ Вт; вид помехоустойчивого кодирования — Витерби.

Анализ результатов и выводы

Уменьшение размеров ЗРВ с ростом надёжности ВРЛ (см. *рис. 2*) приводит к увеличению точности оценки длительности сеанса связи КА ДЗЗ с i -м НППИ dT_i , по сравнению с классическим способом, до 40 % и выше (см. *рис. 4*). В случае низконадёжной ВРЛ оценки по формуле (10) и классическим способом дают примерно одинаковый результат (см. *рис. 4*).

Снижение надёжности радиолинии сопровождается ростом длительности сеанса связи КА ДЗЗ с i -м НППИ (см. *рис. 3*) в связи с уменьшением требований к пороговому отношению сигнал/шум на входе приёмника НА ВРЛ и, как следствие, увеличением размеров ЗРВ.

Учитывая изложенное выше, целесообразно сделать вывод о том, что оценку длительности сеанса связи КА ДЗЗ с i -м НППИ в случае ненадёжной радиолинии практически с одинаковым успехом можно осуществлять как по формуле (10), так и классическим способом, а в случае высоконадёжной радиолинии — по формуле (10).

Таким образом, в работе получено математическое выражение для оценки длительности сеанса связи КА ДЗЗ с i -м НППИ, учитывающее влияние вероятности битовой ошибки передачи информации и обеспечивающее повышение точности оценки до 40 % и выше по сравнению с классическим способом в случае высоконадёжных ВРЛ.

Представляется, что предлагаемая методика может успешно применяться и в смежных научно-технических направлениях, в частности в наземных системах получения и обработки информации, связанной с поиском, обнаружением и распознаванием тел естественного и техногенного происхождения в околоземном космическом пространстве оптическими и радиотехническими системами (Миронов и др., 2018).

Литература

1. Камнев В. Е., Черкасов В. В., Чечин Г. Н. Спутниковые сети связи. М.: Альпина Паблишер, 2004. 536 с.
2. Кащеев А. А. (2016а) Системный подход к выбору пропускной способности высокоскоростной радиолинии для современных космических аппаратов дистанционного зондирования Земли // Вестник Самарского гос. аэрокосм. ун-та им. акад. С. П. Королёва (национального исслед. ун-та). 2016. Т. 15. № 1. С. 180–186.
3. Кащеев А. А. (2016б) Оценка оперативности доставки информации по высокоскоростной радиолинии космических систем дистанционного зондирования Земли // Журн. радиоэлектроники. 2016. № 8. 10 с. URL: <http://jre.cplire.ru/jre/aug16/4/text.pdf>.
4. Куренков В. И., Салмин В. В., Абрамов Б. А. Основы устройства и моделирования целевого функционирования космических аппаратов наблюдения. Самара: Изд-во Самарского гос. аэрокосм. ун-та, 2006. 296 с.
5. Лупян Е. А., Балашов И. В., Бурцев М. А., Ефремов В. Ю., Кашницкий А. В., Кобец Д. А., Крашенинникова Ю. С., Мазуров А. А., Назиров Р. Р., Прошин А. А., Сычугов И. Г., Толпин В. А., Уваров И. А., Флитман Е. В. Создание технологий построения информационных систем дистанционного мониторинга // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2015. Т. 12. № 5. С. 53–75.

6. *Машибиц Л. М.* Зоны обслуживания систем спутниковой связи. М.: Радио и связь, 1982. 169 с.
7. *Миронов В. В., Муртазов А. К., Усовик И. В.* Системные методы мониторинга околоземного космического пространства. Монография. 2-е изд., испр. и дополн. / под науч. ред. проф. Миронова В. В. Рязань: Book Jet, 2018. 318 с.
8. *Урмаев М. С.* Космическая фотограмметрия. М.: Недра, 1989. 279 с.
9. *Hagenaver J., Hoher P.* A Viterbi algorithm with soft-decision outputs and its applications // IEEE Global Telecommunications Conf. (GLOBECOM'89). 1989. V. 3. P. 1680–1685.
10. *Pyndiah R.* Near-optimum decoding of product codes: Block Turbo Codes // IEEE Trans. Communications. 1998. V. 46. Iss. 8. P. 1003–1010.
11. *Viterbi A. J.* Error bounds for convolutional codes and an asymptotically optimum decoding algorithm // IEEE Trans. Information Theory. 1967. V. 12. Iss. 2. P. 260–269.

Improving the accuracy of estimating communication session continuance of Earth remote sensing spacecrafts with ground based data receiving stations for reliable high speed radio links

A. A. Kascheev, V. V. Mironov

Ryazan State Radio Engineering University, Ryazan 390005, Russia
E-mails: alexeikaa81@yandex.ru, mironov1.v.v@rsreu.ru

This paper presents the task of assessing the communication session continuance of spacecrafts with ground-based receiving stations during Earth remote sensing with respect to the reliability of high speed radio links. The problem is based on the assumption that during Earth surface observations, data communication occurs in case the spacecraft is located within the radio coverage of a receiving station, whereas outside it data accumulation takes place in the on-board memory.

The method is proposed to calculate geographic references of the ground-based receiving stations' radio coverage zone boundaries based on the assessment of the current signal/noise ratio (SNR) at a high speed radio link receiver input and its comparison with the threshold SNR under different data communication bit error probabilities. A mathematical expression to assess the continuance of spacecraft communication sessions with ground based receiving stations regarding: the probability of a bit error while transferring data through a high speed radio link; the capacity of the onboard memory; a radio signal parameters (anti-noise coding method and rate, signal phase-shift keying type and index) is obtained. The influence of the data communication bit error probability on the continuance of space craft communication sessions with receiving stations and its estimation accuracy is studied. Recommendations for evaluating the continuance of spacecraft communication sessions with ground based receiving stations for unreliable and highly reliable radio links are provided.

Keywords: radio coverage zones, Earth remote sensing space crafts, receiving stations, high speed radio links, communication session continuance, on-board equipment, on-board memory, anti-noise coding

Accepted: 12.10.2018

DOI: 10.21046/2070-7401-2018-15-6-235-244

References

1. Kamnev V. E., Cherkasov V. V., Chechin G. N., *Sputnikovye seti svyazi* (The satellite telecommunications), Moscow: Al'pina Pablisher, 2004, 536 p.
2. Kashcheev A. A., *Sistemnyi podkhod k vyboru propusknoi sposobnosti vysokoskorostnoi radiolinii dlya sovremennykh kosmicheskikh apparatov distantsionnogo zondirovaniya Zemli* (The System approach to choice of reception capacity to speediest radioline for modern cosmic device of the remote flexing the Land), *Vestnik Samarskogo gosudarstvennogo aerokosmicheskogo universiteta imeni akademika S. P. Koroleva (natsional'nogo issledovatel'skogo universiteta)*, 2016, Vol. 15, No. 1, pp. 180–186.

3. Kashcheev A. A., Otsenka operativnosti dostavki informatsii po vysokoskorostnoi radiolinii kosmicheskikh sistem distantsionnogo zondirovaniya Zemli (Assessment of the Efficiency of Information Delivery on the High-Speed Radioline of Space Systems of Remote Sensing of the Earth), *Zhurnal radioelektroniki*, 2016, No. 8, 10 p., URL: <http://jre.cplire.ru/jre/aug16/4/text.pdf>.
4. Kurenkov V. I., Salmin V. V., Abramov B. A., *Osnovy ustroystva i modelirovaniya tselevogo funktsionirovaniya kosmicheskikh apparatov nablyudeniya* (The Bases device and modeling of the target operation cosmic device observations), Samara: Izd. Samarskogo gosudarstvennogo aerokosmicheskogo universiteta, 2006, 296 p.
5. Loupian E. A., Balashov I. V., Burtsev M. A., Efremov V. Yu., Kashnitskii A. V., Kobets D. A., Krasheninnikova Yu. S., Mazurov A. A., Nazirov R. R., Proshin A. A., Sychugov I. G., Tolpin V. A., Uvarov I. A., Flitman E. V., Sozdanie tekhnologii postroeniya informatsionnykh sistem distantsionnogo monitoringa (Creation technology buildings of the information systems remote monitoring), *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2015, Vol. 12, No. 5, pp. 53–75.
6. Mashbits L. M., *Zony obsluzhivaniya sistem sputnikovoi svyazi* (The Zones of the servicing the systems satellite relationship), Moscow: Radio i svyaz', 1982, 169 p.
7. Mironov V. V., Murtazov A. K., Usovik I. V., *Sistemnye metody monitoringa okolozemnogo kosmicheskogo prostranstva* (System methods for monitoring near-Earth space), Ryazan': Book Jet, 2018, 318 p.
8. Urmaev M. S., *Kosmicheskaya fotogrammetriya* (Cosmic photogrammetry), Moscow: Nedra, 1989, 279 p.
9. Hagenaver J., Hoher P., A Viterbi algorithm with soft-decision outputs and its applications, *IEEE Global Telecommunications Conf. (GLOBECOM'89)*, 1989, Vol. 3, pp. 1680–1685.
10. Pyndiah R., Near-optimum decoding of product codes: Block Turbo Codes, *IEEE Transactions on Communications*, 1998, Vol. 46, Issue 8, pp. 1003–1010.
11. Viterbi A. J., Error bounds for convolutional codes and an asymptotically optimum decoding algorithm, *IEEE Transactions on Information Theory*, 1967, Vol. 12, Issue 2, pp. 260–269.