




DOI: 10.22363/2312-8143-2023-24-4-295-304
EDN: UWBYIW
УДК 629.76

Научная статья / Research article

Повышение эффективности радиолинии космических аппаратов дистанционного зондирования Земли

К.В. Алаторцев  , В.Л. Алаторцев 

Московский физико-технический институт (национальный исследовательский университет),
Долгопрудный, Российская Федерация
 alatorsev.kv@mail.ru

История статьи

Поступила в редакцию: 15 мая 2023 г.
Доработана: 9 сентября 2023 г.
Принята к публикации: 15 сентября 2023 г.

Заявление о конфликте интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Вклад авторов

Нераздельное соавторство.

Аннотация. С появлением расширенных стандартов передачи информационных потоков (типа DVB-S2X) с космических аппаратов дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ) появилась возможность переключать во время работы высокоскоростных радиолиний (ВРЛ) ее параметры для передачи увеличенного (уменьшенного) потока данных. Например, переключение модуляции, коэффициента помехозащищенного LDPC (Low Density Parity Check codes) кодирования и т.п. Это позволяет снизить энергетические затраты на передачу данных и существенно повысить общий информационный поток данных с космических аппаратов на наземные станции приема-обработки информации. Произведены оценки теоретически возможных переходов на соседний режим передачи данных (переход на уровень 0,5–1,5 дБ), что дает суммарный выигрыш в увеличении потока передаваемых данных, который может достигнуть 2,0–2,5 раза при возможном количестве переключений до десяти. На практике, учитывая флуктуационный характер распределения уровня сигнала во время его передачи на наземные станции приема-обработки информации, переключение обеспечивается в меньшем (3–5) числе переходов (при достижении энергетического запаса 3–5 дБ), что приводит к выигрышу в передаче данных 1,5–2,0 раза.

Ключевые слова: наземная приемная станция, космические аппараты, высокоскоростная радиолиния передачи информации, энергетическая эффективность радиолинии

Для цитирования

Алаторцев К.В., Алаторцев В.Л. Повышение эффективности радиолинии космических аппаратов дистанционного зондирования Земли // Вестник Российского университета дружбы народов. Серия: Инженерные исследования. 2023. Т. 24. № 4. С. 295–304. <http://doi.org/10.22363/2312-8143-2023-24-4-295-304>

© Алаторцев К.В., Алаторцев В.Л., 2023



This work is licensed under a Creative Commons Attribution 4.0 International License
<https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/legalcode>

Improving the efficiency of the remote sensing satellite radio line

Kirill V. Alatortsev ^{ID}✉, Vladimir L. Alatortsev ^{ID}

Moscow Institute of Physics and Technology (National Research University, MIPT, “Phystech”),
Dolgoprudny, Russian Federation
✉ alatortsev.kv@mail.ru

Article history

Received: May 15, 2023

Revised: September 9, 2023

Accepted: September 15, 2023

Conflicts of interest

The authors declare that there is no conflict of interest.

Authors' contribution

Undivided co-authorship.

Abstract. With the advent of expanded standards of transfer of information flows (DVB-S2X type) from Earth remote sensing spacecraft (remote sensing), there was an opportunity to switch its parameters for transfer of the increased (reduced) data stream to VHSR operating time. For example, switching of modulation and coefficient of interference-immune LDPC (Low Density Parity Check codes) of coding. It allows to reduce power costs for data transmission and to raise the general information flow of data from remote Sensing Satellites (RSS) to Ground Stations (GS) several times. Estimations of theoretically possible transitions to the next transmission mode of data (transition to the level of 0.5–1.5 dB) are made that gives a total gain in increase in a flow of transmitted data can reach 2.0–2.5 times with the possible number of switchings up to 10. In practice, considering the fluctuation nature of the distribution of the signal level during its transmission to Ground Stations, switching is provided in smaller (3–5) number of transitions (at achievement of a power stock 3–5 dB) that leads to a gain in data transmission by 1.5–2.0 times.

Keywords: ground receiving station, spacecraft, high-speed information transmission radio line, energy efficiency of the radio line

For citation

Alatortsev KV., Alatortsev VL. Improving the efficiency of the remote sensing satellite radio line. *RUDN Journal of Engineering Research*. 2023;24(4):295–304. (In Russ.) <http://doi.org/10.22363/2312-8143-2023-24-4-295-304>

Введение

Во многих случаях, при передаче спутниковой информации дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ) на наземные станции приема-обработки информации (НСПОИ) через высокоскоростную радиолинию (ВРЛ) (рис. 1) поддерживаются постоянными такие параметры, как: несущая частота, модуляция, битовый поток, поляризация и др. [1].

Это приводит к передаче информационных потоков на всем участке сброса данных КА — НСПОИ с повышенным значением энергии на бит передаваемого потока данных (табл. 1), что делает передачу информации ДЗЗ энергетически менее эффективной.

Вместе с тем, с учетом возрастающего количества спутников ДЗЗ в космической группировке, прорабатываются вопросы оптимизации наземной инфраструктуры приема данных ДЗЗ, увеличения пропускной способности радиоли-

нии передачи данных по линии космические аппараты — наземные станции приема-обработки космической информации дистанционного зондирования Земли [2–4].

Целью настоящей работы является получение оценок энергетической избыточности в ВРЛ и выработки стратегии приема информации с космических аппаратов (КА) спутникового мониторинга Земли на основе изменения параметров радиолинии КА — НСПОИ, и получение критерия эффективности использования ВРЛ КА-НСПОИ при передаче данных спутникового мониторинга на наземные станции (НСПОИ).

1. Оценки энергетической избыточности ВРЛ КА-НСПОИ

С появлением расширенных стандартов передачи информационных потоков (типа DVB-S2X)¹ [2; 4–16] появилась возможность переключать во время работы ВРЛ ее параметры для передачи увеличенного (уменьшенного) потока данных (напри-

¹ ГОСТ Р 56456-2015. Телевидение вещательное цифровое. Интегрированный приемник-декодер системы спутникового цифрового вещания второго поколения (DVB-S2). Основные параметры. Технические требования. Национальный стандарт Российской Федерации. М.: Стандартинформ, 2015. 8 с.

мер, переключение параметра созвездия модуляции, коэффициента помехозащищенного LDPC кодирования и др. (рис. 2, табл. 3). Это позволяет снизить энергетические затраты на передачу бита данных и повысить общий информационный поток данных с КА на НСПОИ.

При оптимизации различных параметров радиолинии (табл. 3) суммарный выигрыш в передаче данных в ВРЛ КА — НСПОИ может достигать фактически следующего порядка:

$$\text{КПД} = \frac{900 \text{ mbps}}{100 \text{ mbps}} = 9 \approx 10^1 = 1 \text{ порядок,}$$

где сокращение «КПД» подразумевает коэффициент полезного действия; *mbps* — сокращение

«мегабит в секунду» — поток данных в радиолинии КА — НСПОИ.

Увеличение скорости передачи данных может быть достигнуто за счет увеличения количества пунктов приема данных, оптимизации их пространственного распределения (с учетом большой протяженности территории страны), а также за счет переключения параметров радиолинии (модуляция, глубина помехозащищенного кодирования и т.п.), что и обсуждается в настоящей работе.

Повышение скорости передачи данных с КА на НСПОИ может быть достигнуто для наземных станций с различными энергетическими возможностями (радиус зеркала, наличие системы сопровождения и других параметров).

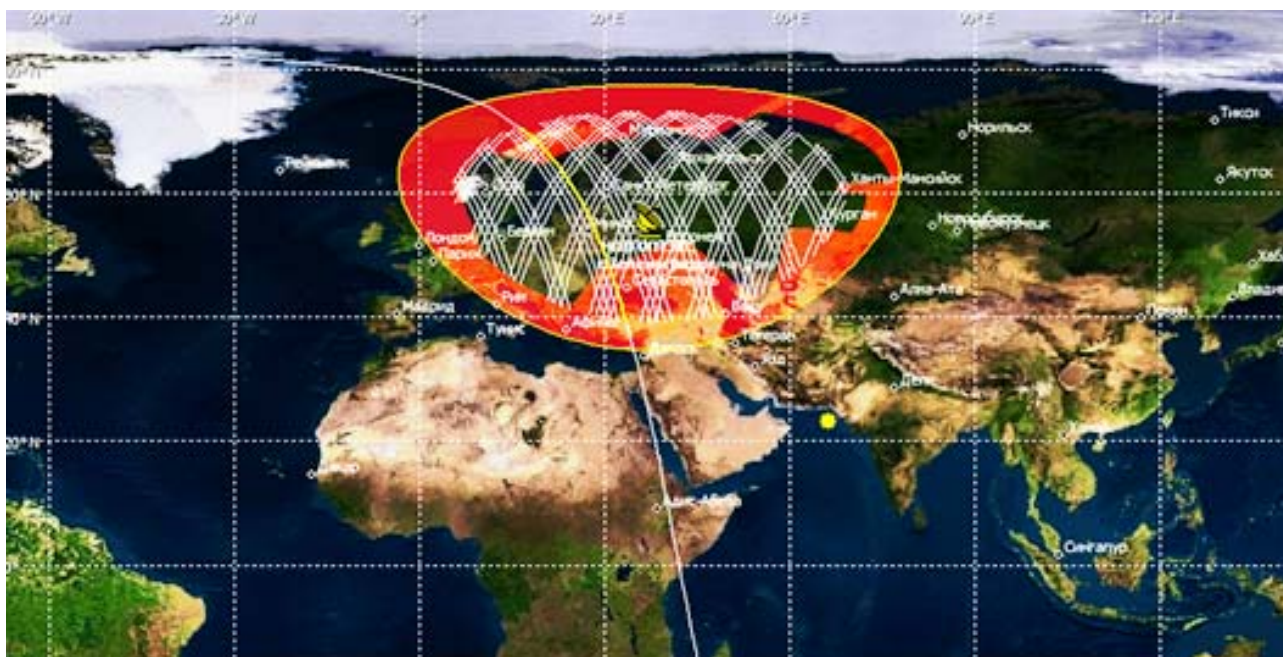


Рис. 1. Сеансы сброса информации с КА ДЗЗ на НСПОИ

Figure 1. Sessions of transmitting of information from Remote Sensing Satellites to Ground Stations

Таблица 1

Энергетический запас в радиолинии при передаче данных с КА ДЗЗ

№ п/п	Высота орбиты МКА H , км	Максимальная наклонная дальность L_{\max} , км	Минимальная наклонная дальность L_{\min} , км	Максимальный избыток энергии в ВРЛ при передаче данных на НСПОИ ΔE , дБ
1	500	2573	500	14,2
2	700	3067	700	12,8
3	1000	3707	1000	11,4

где $L_{\min} = A_2 B_2 = H$, $L_{\max} = A_0 B_2 = \sqrt{(R+H)^2 - R^2}$.

Table 1

Energy reserve in the radio line during data transmission from Remote Sensing Satellites

No.	Orbit height of RSS H , km	Maximum slant range of L_{max} , km	Minimum slant range of L_{min} , km	The maximum excess of energy in VHSR orbit height to GS ΔE , dB
1	500	2573	500	14.2
2	700	3067	700	12.8
3	1000	3707	1000	11.4

where $L_{min} = A_2 B_2 = H$, $L_{max} = A_0 B_2 = \sqrt{(R+H)^2 - R^2}$.

Таблица 2

Время (t) нахождения КА ДЗЗ в зоне радиовидимости НСПОИ

№ п/п	Высота орбиты КА, H , км	Период обращения T КА, мин / сек	Время в зоне радиовидимости t , мин	Время в зоне радиовидимости t , сек
1	500	94,44 / 5666	11,53	692
2	700	98,59 / 5915	14,08	844
3	1000	104,93 / 6296	17,60	1056

Table 2

Time (t) of finding RSS in the zone of radio visibility of GS

No.	Height orbits of RSS, H , km	Period RSS, T , minutes/sec	Time in zone of radio visibility t , minutes	Time in zone of radio visibility t , sec
1	500	94.44 / 5666	11.53	692
2	700	98.59 / 5915	14.08	844
3	1000	104.93 / 6296	17.60	1056

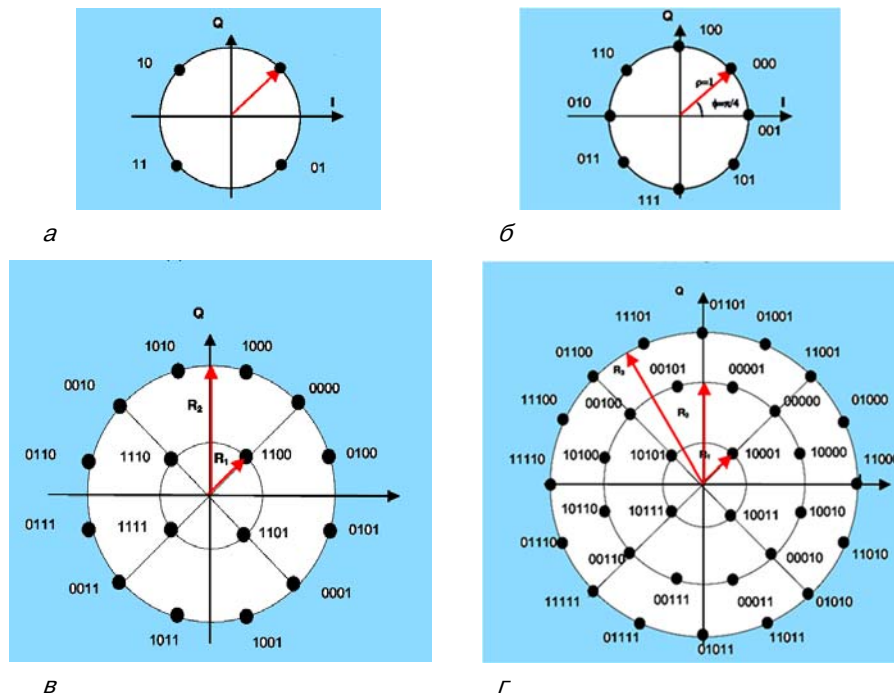


Рис. 2. Созвездия модуляций DVB-S2X данных КА ДЗЗ: а— QPSK; б— 8PSK; в— 16APSK; г— 32APSK
Figure 2. DVB-S2 Modulation Constellation VHSR information of the remote sensing satellites:
 а— QPSK; б— 8PSK; в— 16APSK; г— 32APSK

Таблица 3 / Table 3

Режимы ВРЛ (DVB-S2) сброса информации с КА на НСПОИ [2]
The VHSR (DVB-S2) modes of dumping of information from RSS to Ground Stations [2]

№ п/п No.	Модуляция / Modulation	Глубина LDPC кодирования / Depth of LDPC encoding	Информационный поток ВРЛ / VRL information bit-rate (mbps)	Полезная информация / Useful information (mbps)	Базовый уровень отличий, дБ / Basic level differences, dB	Отличия между соседними уровнями, $ \Delta E $, дБ / Differences between adjacent levels $ \Delta E $, dB
1	QPSK	1/4	400	100	-2,35	—
2	QPSK	1/3	400	133	-1,24	1,11
3	QPSK	2/5	400	160	-0,30	0,96
4	QPSK	1/2	400	200	1,00	0,70
5	QPSK	3/5	400	240	2,23	1,23
6	QPSK	2/3	400	267	3,10	0,87
7	QPSK	3/4	400	300	4,03	0,93
8	QPSK	4/5	400	320	4,68	0,65
9	QPSK	5/6	400	333	5,18	0,50
10	QPSK	8/9	400	356	6,20	1,02
11	QPSK	9/10	400	360	6,42	0,22
12	8PSK	3/5	600	360	5,50	0,98
13	8PSK	2/3	600	400	6,62	1,12
14	8PSK	3/4	600	450	7,91	1,29
15	8PSK	5/6	600	500	9,35	1,44
16	8PSK	8/9	600	533	10,69	1,34
17	8PSK	9/10	600	540	10,98	1,29
18	16APSK	2/3	800	533	8,97	2,01
19	16APSK	3/4	800	600	10,21	1,24
20	16APSK	4/5	800	640	11,03	0,82
21	16APSK	5/6	800	667	11,61	0,58
22	16APSK	8/9	800	711	12,89	1,28
23	16APSK	9/10	800	720	13,13	0,24
24	32APSK	3/4	1000	750	12,73	0,40
25	32APSK	4/5	1000	800	13,64	0,81
26	32APSK	5/6	1000	833	14,28	0,64
27	32APSK	8/9	1000	889	15,69	1,41
28	32APSK	9/10	1000	900	16,05	0,36

Таблица 4

Угол наблюдения КА (α) с НСПОИ для различных наклонных дальностей L

H/L, км	500	550	600	700	750	800	1000
500	90°	64,4°	55,0°	43,4°	40,5°	37,7°	26,2°
700	x	x	x	90°	67,8°	59,4°	41,3°
1000	x	x	x	x	x	x	90°

H/L, км	1050	1100	1500	2000	2573	3067	3707
500	24,9°	23,6°	13,2°	5,9°	0°	x	x
700	39,4°	37,4°	22,0°	12,3°	6,4°	0°	x
1000	70,9°	63,4°	37,0°	22,5°	14,6°	6,4°	0°

Table 4

The observation angle of RSS (α) from Ground Stations for different slant ranges of L

H/L, км	500	550	600	700	750	800	1000
500	90°	64.4°	55.0°	43.4°	40.5°	37.7°	26.2°
700	X	x	x	90°	67.8°	59.4°	41.3°
1000	X	x	x	x	x	x	90°

H/L, км	1050	1100	1500	2000	2573	3067	3707
500	24.9°	23.6°	13.2°	5.9°	0°	x	x
700	39.4°	37.4°	22.0°	12.3°	6.4°	0°	x
1000	70.9°	63.4°	37.0°	22.5°	14.6°	6.4°	0°

В расчетах использованы:

– период T обращения спутника на орбите

Земли:

$$T = \frac{2\pi}{\omega} = 2\pi(R + H)^{3/2}(G \cdot M)^{-1/2},$$

– время t нахождения КА в зоне радиовидимости:

$$t = 2 \arccos(R/(R + H)) \cdot T/(2\pi),$$

а также следующие значения переменных:

$$R = 6371 \text{ км},$$

$$H = 500, 700, 1000 \text{ км},$$

$$M = 5,98 \cdot 10^{24} \text{ кг},$$

$$G = 6,67 \cdot 10^{-11} \text{ Н} \cdot \text{м}^2/\text{кг}^2.$$

В течение времени нахождения КА в зоне радиовидимости НСПОИ (см. табл. 2) можно неоднократно предусмотреть переключение с режима на режим ВРЛ КА, что позволяет достигнуть многократного увеличения общего объема в потоке передачи данных с КА на НСПОИ.

При теоретически возможном переходе на соседний режим передачи данных (переход на уровень 0,5–1,5 дБ) суммарный выигрыш в увеличении потока передаваемых данных может достигнуть 2,0–2,5 раза. Однако на практике, учитывая флуктуационный характер распределения уровня сигнала во время его передачи на НСПОИ, переключение обеспечивается в меньшем числе переходов (при достижении запаса 3–5 дБ), что приводит к выигрышу в передаче данных только в 1,5–2,0 раза.

2. Эффективность использования радиолинии КА-НСПОИ

Приведем оценки эффективности использования параметров радиолинии при передаче информационных потоков от КА до НСПОИ. Расстояние до КА от различных его положений на орбите ($L_1, L_2, \Delta L = L_1 - L_2$) рассчитывается следующим образом (см. обозначения на рис. 3, а): здесь α — угол места, $\alpha = (\pi/2) - (\varphi + \gamma)$, где $\gamma = 2 \arcsin(R \cos \alpha / (R + H)) \cdot T / (2\pi)$.

$$\begin{cases} (R + H)^2 = R^2 + L_1^2 + 2 \cdot R \cdot L_1 \cdot \sin \alpha_1 \\ (R + H)^2 = R^2 + L_2^2 + 2 \cdot R \cdot L_2 \cdot \sin \alpha_2 \end{cases}'$$

откуда: $L_1^2 - L_2^2 = 2 \cdot R \cdot (L_2 \cdot \sin \alpha_2 - L_1 \cdot \sin \alpha_1)$, в котором L_2 определяется из необходимого дополнительного накопленного запаса энергии для осуществления переключения на следующий уровень конфигурирования параметров ВРЛ:

$$\Delta E = 20 \lg(L_1 / L_2)$$

при значениях $\Delta E = 3 \dots 5$ дБ, и следующая точка орбиты с заданным L_2 по отношению к предыдущему L_1 определяется:

$$\sin \alpha_2 = ((L_1^2 - L_2^2) / (2 \cdot R) + L_1 \cdot \sin \alpha_1) / L_2.$$

Время движения КА по орбите между (α_1, α_2) (соответственно между (φ_1, φ_2)) составляет

$$\Delta t = (T/(2\pi)) \cdot (\varphi_2 - \varphi_1),$$

где взаимосвязь углов φ и α следующая (см. табл. 4) из ΔOA_1B_2 :

$$(R + H) \cdot T / \sin\left(\frac{\pi}{2} + \alpha\right) = R / \sin \gamma$$

откуда

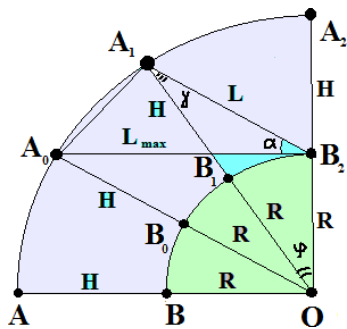
$$\gamma = \arcsin(R \cos \alpha / (R + H))$$

$$\varphi_i = \frac{\pi}{2} - (\alpha_i + \gamma_i), \quad i = 1, 2.$$

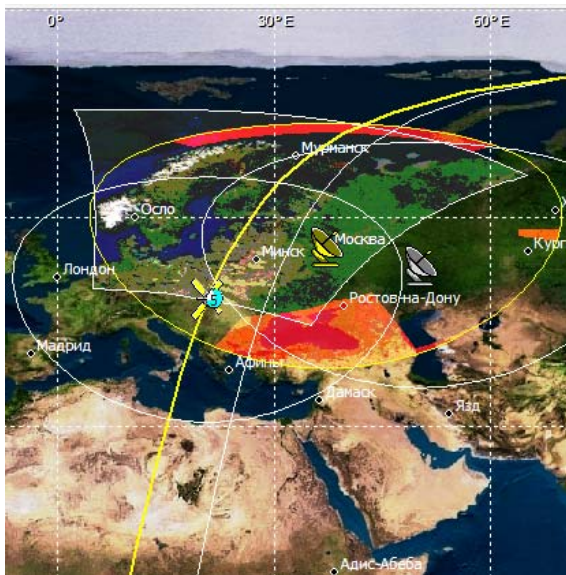
Расчеты выполнены для

$$\sin \alpha = ((R + H)^2 - R^2 + L^2) / (2 \cdot R \cdot L)$$

при $R = 6371$ км.



а



б

Рис. 3. Фрагмент половины ($A_0 - A_1 - A_2$) траектории КА в зоне радиовидимости НСПОИ (положение точки B_2): а — схема обозначений, б — компьютерное моделирование
Figure 3. Fragment of half ($A_0 - A_1 - A_2$) of the spacecraft trajectory in the radio visibility zone of the Ground Station (point B_2): а — notation scheme, б — computer modeling

3. Результаты моделирования

Иллюстрация эффекта увеличения энергетической эффективности радиолинии при передаче информации с КА ДЗЗ на НСПОИ представлена на рис. 4. Точка N соответствует расположению наземной станции (НСПОИ), $R = ON = 6371$ км — радиус Земли, траектория движения КА — суть $A-B-D-F-Z-...$, B — точка входа в зону радиовидимости КА со стороны НСПОИ. Для простоты в модельном представлении зоны движения КА до кульминации (Z) разбиты на $n = 3$ равноугловые сектора: BOD, DOF, FOZ (O — центр Земли). Движение КА в каждом из секторов происходит с неизменными параметрами радиолинии. В начале каждого из секторов (точки B, D, F, ...) параметры ВРЛ настроены на достаточный в энергетическом плане режим для передачи данных.

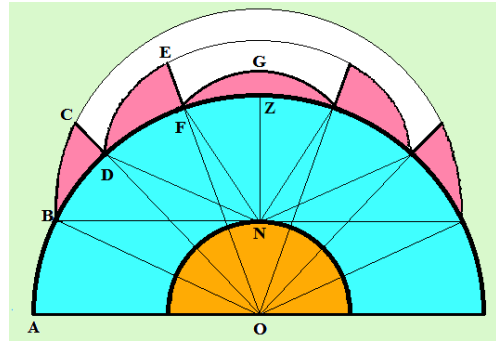


Рис. 4. Движение КА ДЗЗ в зоне радиовидимости НСПОИ (N) с переключением параметров ВРЛ для повышения ее энергетической эффективности $\Omega(n, H)$
Figure 4. The movement of the remote sensing satellites in the radio visibility zone of the Ground Stations (N) with switching of the parameters of the VHSR to increase its energy efficiency $\Omega(n, H)$

Вследствие уменьшения на восходящей части траектории движения расстояния L от наземной станции до космического аппарата появляется возможность в конце сектора произвести переключение режимов работы радиолинии на более высокоскоростной режим передачи данных пропорционально отношению $(L_0 / L_1)^2$, где L_0 суть BN , а L_1 — соответствующее расстояние от НСПОИ до концов секторов DN, FN, ZN, \dots . Области BCD, DEF, FGZ — иллюстрируют избыток затрачиваемой энергии при передаче данных с КА на НСПОИ. В предельном случае можно представить непрерывное переключение скорости ВРЛ передачи данных и получить зна-

чительный количественный эффект в повышении эффективности работы ВРЛ. Оценки произведены для кульминационного витка по отношению к стартовой точке, совпадающей с появлением КА в зоне радиовидимости НСПОИ. В качестве оценки энергетической эффективности ВРЛ выбран параметр $\Omega(n, H)$:

$$\Omega(n, H) = \frac{2}{n} \cdot \sum_{i=1}^{i=n} (L_0(H, \varphi) / L_i(H, \varphi))^2 = \frac{2}{\arccos\left(\frac{R}{R+H}\right)} \cdot \int_{\varphi_1}^{\varphi_2} \mathfrak{Z}(\varphi) d\varphi$$

где

$$\mathfrak{Z}(\varphi) = (L_0(H, \varphi) / L(H, \varphi))^2, \\ L(H, \varphi)^2 = (R + H)^2 + R^2 - 2 \cdot R \cdot (R + H) \cdot \cos(\varphi),$$

а секторальный угол (φ) равняется углам BOD, DOF, FOZ, ...

В частном случае, когда в качестве стартовой точки взята точка входа в зону радиовидимости НСПОИ, значение $L_0(H, \varphi)$ представляется в упрощенном виде:

$$[L_0(H, \varphi)]^2 = [L_0(H)]^2 = [L_{BN}(H)]^2 = (R + H)^2 - R^2.$$

Отметим, что секторальные углы следует отсчитывать привязанными к вершине O (центр Земли) вследствие равномерного движения КА по орбите вокруг Земли и упрощения процедуры интегрирования при вычислении параметра эффективности $\Omega(n, H)$.

В табл. 5 представлены расчетные параметры секторов движения КА в зоне радиовидимости НСПОИ при двукратном ($n = 3$) переключении параметров ВРЛ.

Смоделированные параметры эффективности ВРЛ для характерных высот $H = 500, 700, 1000$ км работы КА ДЗЗ представлены в табл. 6.

Таблица 5 / Table 5

Параметры секторов движения КА в зоне радиовидимости НСПОИ
Parameters of sectors of the movement RSS in zone of radio visibility of GS

№ п/п No.	Орбита КА ДЗЗ / Orbit of RSS	H, км	500, км	700, км	1000, км
1	Участок BD / BD site	φ_{BOZ}	22,0°	25,7°	30,2°
		L_{BN}	2573 км	3067 км	3707 км
2	Участок DF / DF site	φ_{DOZ}	14,7°	17,1°	20,1°
		L_{DN}	1761 км	2119 км	2596 км
3	Участок FZ / FZ site	φ_{FOZ}	7,3°	8,6°	10,1°
		L_{FN}	983 км	1223 км	1564 км
4	Повышение энергоэффективности ВРЛ / Increase of energy efficiency of VHSR	$\Omega(n, H) (n=3)$	3,33	3,13	2,89

Таблица 6 / Table 6

Повышение энергетической эффективности ВРЛ: $\Omega(n, H)$
Increase of power efficiency of VHSR: $\Omega(n, H)$

№ п/п / No.	Высота H, км, секторов переключений: / Height H, km, sectors of switchings:	500	700	1000
1	($n = 1$)	1,00	1,00	1,00
2	($n = 2$)	2,28	2,21	2,11
3	($n = 3$)	3,33	3,13	2,89
4	($n = 5$)	4,66	4,18	3,68
5	($n = 10$)	5,91	5,09	4,32
6	($n = 100 \rightarrow \infty$)	7,06	5,91	4,90

В действительности, значения $\Omega(n, H)$ могут оказаться ниже, если в качестве стартовой точки движения КА выбрать точку с ненулевым углом места (α), ответственную за параметр $\Omega(n, H)$.

Кроме того, реальные расчеты выполняются с учетом трехмерности траекторий движения КА в околоземном пространстве (см. рис. 1), это приводит к появлению незначительных форм-факторов — поправок порядка единицы.

Заключение

Следует отметить что конкретный расчет энергетической эффективности $\Omega(n, H)$, выполненный с реальными параметрами НСПОИ и ВРЛ, позволяет сформировать технологию подготовки данных для передачи информации с КА на НСПОИ.

Расчеты с энергетическими запасами

$$\Delta E = 1 \dots 5 \text{ дБ}$$

между соседними точками переключения режимов работы ВРЛ приводят к возможному количеству переключения режимов работы ВРЛ от 15 до 3 для траекторий КА в окрестности НСПОИ, близкими к зенитному положению кульминационных точек (см. также рис. 2, б).

Список литературы

1. Материалы XVIII научно-технической конференции «Системы наблюдения, мониторинга и дистанционного зондирования Земли». Москва, Зеленоград. (г. Сочи, 12–17 сентября 2022 г.), 2022. 284 с.
2. Кащеев А.А., Гусев С.И. Алгоритм построения зоны радиовидимости наземных приемных станций для высоконадежных космических радиолиний // Вестник Рязанского государственного радиотехнического университета. 2018. № 66. Ч. 1. С. 16–21. <https://doi.org/10.21667/1995-4565-2018-66-4-1-16-21>
3. Ерешко М.В., Борисов А.В. Концептуальные сценарии развития наземной космической инфраструктуры приема целевой информации перспективной орбитальной группировки дистанционного зондирования Земли // Космическая техника и технологии. 2021. № 2 (33). С. 119–129. <https://doi.org/10.33950/spacetech.2308-7625-2021-2-119-129>
4. Ершов А.Н., Березкин В.В., Петров С.В., Почивалин Д.А. Особенности расчета и проектирования высокоскоростных радиолиний космических аппаратов ДЗЗ // Ракетно-космическое приборостроение и информационные системы. 2018. Т. 5. Вып. 1. С. 52–57. <https://doi.org/10.30894/issn2409-0239.2018.5.1.52.57>

5. Digital Video Broadcasting (DVB). Part 1 (DVB-S2). DVB Document A171-1, 2015. 115 p. URL: https://dvb.org/wp-content/uploads/2019/12/a171-1_s2_guide.pdf (дата обращения: 12.03.2023)

6. Куренков В.И. Основы проектирования космических аппаратов оптико-электронного наблюдения поверхности Земли. Самара: Изд-во Самарского университета, 2020. 461 с.

7. Кирилин А.Н., Ахметов Р.Н., Шахматов Е.В., Ткаченко С.И., Бакланов А.И., Салмин В.В., Семкин Н.Д., Ткаченко И.С., Горячкин О.В. Опыт-технологический малый космический аппарат «Аист-2Д». Самара: Изд-во СамНЦ РАН, 2017. 324 с.

8. Lloyd J.M. Thermal Imaging Systems. Springer New York; NY Publ.; 1975. 455 p. <https://doi.org/10.1007/978-1-4899-1182-7>

9. Ахметов Р.Н., Баранов Д.А., Еремеев В.В., Фалеев О.В. Технологии обработки данных от систем ДЗЗ АО «РКЦ «Прогресс» // Системы наблюдения, мониторинга и дистанционного зондирования Земли: материалы XVI научно-технической конференции. Калуга, Манускрипт, 2019. С. 165–173.

10. Paul G., Wiele J.F., White M.H. Solid State Imaging. Noordhoff-Leyden, 1976. 745 p. URL: https://dvb.org/wp-content/uploads/2019/12/a171-1_s2_guide.pdf (дата обращения: 12.03.2023).

11. Антюфриева Л.А. Разработка и исследование алгоритмов обработки сигналов физического уровня спутниковой системы связи: дис. ... канд. тех. наук. М., МФТИ, 2021. 109 с.

12. ESTI TR 102 376-2 V1.2.1 (2021-01) Digital Video Broadcasting (DVB); Implementation guidelines for the second generation system for Broadcasting, Interactive Services, New Gathering and other broadband satellite applications; Part 2: S2 Extensions (DVB-S2X), 2021.

13. Дворкович В.П., Дворкович А.В. Цифровые информационные системы: теория и практика. М.: Техносфера, 2012. 1008 с.

14. Ткаченко Д.А., Батов Ю.В., Пузько Д.А., Гельгор А.Л. Оценка эффективности использования цифровой предкоррекции в усилителях мощности спутниковых систем DVB-S2/S2X // Радиотехника. 2022. Т. 86. № 12. С. 47–57. <https://doi.org/10.18127/j00338486-202212-04>

15. Гельгор А.Л., Ткаченко Д.А., Батов Ю.В., Пузько Д.А. Повышение скорости передачи информации через спутниковые каналы вещания путем применения мультиплексирования сигналов с разделением по уровню мощности // Радиотехника. 2021. Т. 85. № 11. С. 138–145. <https://doi.org/10.18127/j00338486-202111-18>

16. Extending DVB-S2. New technology for satellite transmission DVB-S2X. DVB Fact Sheet. Apr. 2018.

References

1. *Systems of supervision, monitoring and remote sensing of Earth. Materials XVIII of scientific and*

technical conference. Moscow, Zelenograd; 2022. (In Russ.)

2. Kascheev AA, Gusev SI. Construction algorithm for radio visibility zone of Ground Receiving Stations for highly reliable space radio links. *Vestnik of Ryazan state radio engineering University*. 2018;66(1):16–21. (In Russ.) <https://doi.org/10.21667/1995-4565-2018-66-4-1-16-21>

3. Ereshko MV, Borisov AV. Conceptual scenarios for development of ground infrastructure for receiving mission payload data from a perspective earth remote sensing satellite constellation. *The Space Engineering and Technology magazine*. 2021;2(33):119–129. (In Russ.) <https://doi.org/10.33950/spacetech2308-7625-2021-2-119-129>

4. Ershov AN, Berezkin VV, Petrov SV, Pochivalin DA. Features of Calculation and Designing of High-Speed Radio Links of Earth Remote Sensing Spacecraft. *Rocket-Space Device Engineering and Information Systems*. 2018;5(1):52–57. (In Russ.) <https://doi.org/10.30894/issn2409-0239.2018.5.1.52.57>

5. *Digital Video Broadcasting (DVB). Part 1 (DVB-S2). DVB Document A171-1*. 2015:115. Available from: https://dvb.org/wp-content/uploads/2019/12/a171-1_s2_guide.pdf (accessed: 12.03.2023).

6. Kurenkov VI. *Bases of design of spacecrafts of optical-electronic supervision of the Earth's surface*. Samara: Samara University Publ.; 2020. (In Russ.)

7. Kirilin AN, Akhmetov RN, Shakhmatov EV, Tkachenko SI, Baklanov AI, Salmin VV, Semkin ND, Tkachenko IS, Goryachkin OV. *Experienced and technological small Stork-2D spacecraft*. Samara: SamNZ RAHN Publ.; 2017. (In Russ.)

8. Lloyd JM. *Thermal Imaging Systems*. Springer New York: NY Publ.; 1975. <https://doi.org/10.1007/978-1-4899-1182-7>

9. Akhmetov RN, Baranov DA, Yeremeyev VV, Faleev OV. Technologies of data processing from systems DZZ JSC RKTs “Progress”. *Systems of supervision, monitoring and remote sensing of Earth. Materials XVI of scientific and technical conference*. Kaluga: Manuscript, 2019:165–173. (In Russ.)

10. Paul G, Van de Wiele JF, White MH. *Solid State Imaging*. Noordhoff-Leyden, 1976. Available from: https://dvb.org/wp-content/uploads/2019/12/a171-1_s2_guide.pdf (accessed: 12.03.2023)

11. Antyufriyeva LA. *Development and research of algorithms of processing of signals of physical layer of satellite system of communication*. Thesis Cand.Tech.Sci.: Moscow: MFTI; 2021. (In Russ.)

12. ESTI TR 102 376-2 V1.2.1 (2021-01) Digital Video Broadcasting (DVB); Implementation guidelines for the second generation system for Broadcasting, Interactive Services, New Gathering and other broadband satellite applications; Part 2: S2 Extensions (DVB-S2X), 2021.

13. Dvorkovich VP, Dvorkovich AV. *Digital intelligence systems (Theory and practice)*. Moscow: Tekhnosfera Publ.; 2012. (In Russ.)

14. Tkachenko DA, Batov YuV, Puzko DA, Gelgor AL. Estimation of effectiveness for application of digital predistortion in high power amplifiers of DVB-S2/S2X satellite systems. *Journal Radioengineering*. 2022;86(12):47–57. (In Russ.) <https://doi.org/10.18127/j00338486-202212-04>

15. Gelgor AL, Tkachenko DA, Batov YuV, Puzko DA. Application of Layered Division Multiplexing for increasing bitrates of satellite broadcasting channels. *Journal Radioengineering*. 2021;85(11):138–145. (In Russ.) <https://doi.org/10.18127/j00338486-202111-18>

16. Extending DVB-S2. New technology for satellite transmission DVB-S2X. DVB Fact Sheet. Apr. 2018.

Сведения об авторах

Алаторцев Кирилл Владимирович, студент факультета аэрокосмических технологий, Московский физико-технический институт (национальный исследовательский университет, МФТИ, «Физтех»), Долгопрудный, Российская Федерация; ORCID: 0009-0001-8920-045X; E-mail: alatortsev.kv@mail.ru

Алаторцев Владимир Леонидович, кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник, Московский физико-технический институт (национальный исследовательский университет), Долгопрудный, Российская Федерация; ORCID: 0009-0003-6001-1692; E-mail: vova.alatortcev.60@mail.ru

About the authors

Kirill V. Alatortsev, Student of the Faculty of Aerospace Technologies, Moscow Institute of Physics and Technology (National Research University, MIPT, «Phystech»), Dolgoprudny, Russian Federation; ORCID: 0000-0002-9348-861X; E-mail: alatortsev.kv@mail.ru

Vladimir L. Alatortsev, Candidate of Physical and Mathematical Sciences, Senior Researcher, Moscow Institute of Physics and Technology (National Research University, MIPT, «Phystech»), Dolgoprudny, Russian Federation; ORCID: 0009-0003-6001-1692; E-mail: vova.alatortcev.60@mail.ru