

Сравнение вариантов построения абонентской аппаратуры ретрансляции телеметрической информации РН, РБ и КА через спутник-ретранслятор системы «Луч»

С. И. Ватутин

к. т. н., ОАО «Российские космические системы»

e-mail: otd0943_vsi@mail.ru

Аннотация. Проведено сравнение вариантов построения абонентской аппаратуры ретрансляции на основе многоканальных радиолиний и на базе одноканальной радиолинии с фазированной антенной решеткой. Предложено трехступенчатое построение абонентской аппаратуры ретрансляции на основе трехканальной радиолинии.

Ключевые слова: энергетический потенциал радиолинии, антенна, коэффициент усиления антенны, скорость передачи информации, активная фазированная антенная решетка

Comparison of Construction Variants of Retransmitting Equipment of TM-Information from Carrier Rockets, Upper-Stage Rockets and Space Vehicles Via “Luch” Satellite Re-Transmitter

S. I. Vatutin

candidate of engineering science, Joint Stock Company “Russian Space Systems”

e-mail: otd0943_vsi@mail.ru

Abstract. It is done comparison of construction variant of subscriber retransmitting equipment on multi-channel radio link base as compared with variant on single-channel radio link with phased-array antenna base. It is proposed three-stage construction variant of subscriber retransmitting equipment on three-channel radio link base.

Key words: radio link power budget, antenna, antenna gain, information rate, phased-array antenna

При запуске космического аппарата (КА) с космодрома Байконур на геостационарные орбиты и орбиты ГЛОНАСС импульсы разгона для выхода с опорной на переходную орбиту, как правило, осуществляются разгонными блоками вне зоны радиовидимости с территории России примерно над Южной Америкой. При этом, в силу отсутствия в настоящее время системы ретрансляции телеметрии на территорию России с обратной стороны Земли, контроль проведенных импульсов разгона разгонного блока (РБ) осуществляется путем нацеливания антенн телеметрических средств на «штатную» и «аварийную» орбиту, соответственно, для запланированной величины разгонного импульса двигателей РБ и полного отсутствия такового. Всевозможные промежуточные аварийные значения импульса разгона во внимание не принимаются из-за отсутствия в наземном автоматизированном комплексе управления (НАКУ) КА достаточного количества станций слежения. Ситуация существенно усложняется в связи с появлением в настоящее время «интеллектуальных» РБ типа «Волга», которые могут самостоятельно принимать решение о требуемой величине разгонного импульса в зависимости от фактических параметров опорной орбиты, что может привести к нескольким возможным реализациям переходной орбиты и, соответственно, к нескольким возможным точкам входа в зону радиовидимости телеметрических средств НАКУ. Отсюда настоятельная необходимость знать вектор состояния РБ (X, Y, Z, V_X, V_Y, V_Z) на момент окончания импульса разгона. Та же самая проблема существует относительно КА при отделении его от ракеты-носителя (РН) на обратной стороне Земли: для телеметрического контроля на территории России надо знать векторы состояния РН и КА на момент их разделения. Таким образом, минимально необходимый объем информации, который надо передать с РН, КА и РБ через спутник-ретранслятор (СР) для их своевременной и надлежащей встречи по нужному направлению средствами НАКУ, состоит в передаче вектора состояния из 6 параметров плюс время окончания импульса. Пусть для передачи координаты, скорости или времени достаточно 4 байтов. Тогда минимально необходимый объем информации для встречи КА и РН составляет всего 28 байтов или 224 бита,

что с учетом накладных расходов приведет к объему порядка 1 Кбит. То есть по радиолинии со скоростью порядка 1 кбит/с минимально необходимый объем информации для «встречи» объекта ракетно-космической техники (ОРКТ — РН, РБ или КА) после импульса разгона, отделения или совершения маневра может быть передан не более чем за 1–2 с.

Теперь перейдем к оценке скорости передачи информации через спутник-ретранслятор, которую может обеспечить одна антенна абонентской аппаратуры ретрансляции (ААР) с опорной орбиты.

Энергетический потенциал радиолинии ОРКТ–СР определяется классической формулой [1, 2]:

$$P_r = \frac{P_t \cdot G_t \cdot \eta_p \cdot S_{\text{эфр}}}{4 \cdot \pi \cdot r^2}, \quad (1)$$

где:

P_r — мощность сигнала на входе приемника, Вт;

$\eta_p = \eta_t \cdot \eta_r \cdot \eta_{\text{пол}} \cdot \eta_n$ — результирующий коэффициент потерь при передаче сигнала в тракте ОРКТ–СР;

P_t — мощность передатчика;

G_t — коэффициент усиления антенны передатчика;

η_t — коэффициент полезного действия АФУ передатчика;

η_r — коэффициент полезного действия АФУ приемника;

$\eta_{\text{пол}}$ — коэффициент поляризационных потерь;

η_n — коэффициент потерь от неточного наведения антенн;

$S_{\text{эфр}}$ — эффективная поверхность приемной антенны;

r — наклонная дальность.

С другой стороны, справедливо выражение [1]:

$$P_r = \left(\frac{P_r}{P_{\text{ш}}} \right)_{\text{треб}} \cdot 2 \cdot k_0 \cdot m \cdot t^\circ \cdot R, \quad (2)$$

где $k_0 = 1,38 \cdot 10^{-23}$ — постоянная Больцмана;

t° — эквивалентная шумовая температура входного каскада приемника;

R — скорость передачи информации;

m — коэффициент, учитывающий количество лепестков спектра радиосигнала, попадающих в полосу приемника, обычно $m = 1, 2$, максимум 3.

Из (1) и (2) получаем:

$$R = \frac{G_t \cdot K_t \cdot \eta_{\text{п}} \cdot S_{\text{эф}}}{4 \cdot \pi \cdot r^2 \cdot \left(\frac{P_r}{P_{\text{ш}}} \right)_{\text{треб}} \cdot 2 \cdot k_0 \cdot m \cdot t^\circ} \quad (3)$$

Коэффициент усиления апертурной антенны определяется известным выражением:

$$G = \frac{4 \cdot \pi \cdot S_{\text{эф}}}{\lambda^2} = \frac{4 \cdot \pi \cdot S_{\text{эф}}}{\left(\frac{c}{f_{\text{н}}} \right)^2}, \quad (4)$$

где λ и $f_{\text{н}}$ — длина волны и значение несущей частоты, c — скорость света в свободном пространстве. Из (3) с учетом (4) получаем следующее выражение для оценки достижимой скорости передачи информации по исходным данным из [3] для радиолинии ОРКТ–СР:

$$R = \frac{P_t \cdot G_t \cdot \eta_{\text{п}} \cdot \left(\frac{c}{f_{\text{н}}} \right)^2 \cdot G_r}{(4 \cdot \pi \cdot r)^2 \cdot \left(\frac{P_r}{P_{\text{ш}}} \right)_{\text{треб}} \cdot 2 \cdot k_0 \cdot m \cdot t^\circ} \quad (5)$$

Опираясь на исходные данные разработчиков ААР [3], приняв коэффициент усиления микрополосковой антенны ААР равномерным в полусфере и равным 2, а также считая, что при фазовой манипуляции на $\pm 180^\circ$ с запасом достаточно полоса частот с 2 лепестками спектра радиосигнала, получены следующие опорные значения допустимых скоростей передачи информации в одном канале с одной антенны ОРКТ:

- для широкого луча СР в режиме многостанционного доступа (МСД): 97 бит/с;
- для узкого луча СР в режиме индивидуального доступа (ИД): 9260 бит/с.

Таким образом, из линейки типовых скоростей передачи ТМИ в 1, 8, 32, 64, 128, 256, 512 кбит/с, 1, 2, 3 Мбит/с одна антенна на ОРКТ при отсутствии помехоустойчивого кодирования радиосигнала обеспечивает только две низшие скорости в 1 и 8 кбит/с и только при работе по узкому лучу.

В работе [4] показано, что из кодов с исправлением ошибок наибольший энергетический выигрыш в 8,9 дБ или в 7,76 раза дают так называемые

турбокоды. С учетом кодирования турбокодом получаем следующие допустимые скорости передачи информации с одной антенны ОРКТ:

- для широкого луча СР в режиме МСД: $97 \times 7,76 = 752$ бит/с;
- для узкого луча СР в режиме ИД: $9260 \cdot 7,76 = 71\,857$ бит/с.

Таким образом, при помехоустойчивом кодировании одноканальная система передачи информации через одну антенну ОРКТ может обеспечить 4 низшие скорости передачи информации в 1, 8, 32 и 64 кбит/с по узкому лучу СР.

Широкий луч может использоваться только для передачи малых объемов наиболее существенной информации типа навигационного вектора состояния ОРКТ. Но поскольку экспертные оценки показывают, что успешными были только 75% попыток наведения узкого луча спутника-ретранслятора на космическую станцию «Мир» для первой реализации системы «Луч» на базе КА «Альтаир», то возможностью работы по широкому лучу пренебрегать нельзя.

Поэтому система передачи информации с ОРКТ через СР должна содержать две компоненты: низкоскоростную систему передачи по широкому лучу телесигнализации о навигационном векторе состояния ОРКТ после маневра и систему передачи ТМИ по узкому лучу.

Для реализации передачи ТМИ по узкому лучу со скоростями 128, 256, 512 кбит/с, 1, 2, 3 Мбит/с потребуется соответствующим образом увеличить энергетический потенциал радиолинии ОРКТ–СР, установив на ОРКТ, соответственно, 2, 4, 8, 15, 29, 43 антенны и передатчика. При этом, естественно, не возбраняется передавать информацию через несколько антенн и по широкому лучу спутника-ретранслятора. Данные о возможных скоростях передачи информации в многоантенной ААР через одноканальную радиолинию с активной фазированной антенной решеткой (АФАР) и через многоканальную радиолинию (МКРЛ) сведены в таблицу.

Далее можно поступить двояко:

- 1) объединить все N всенаправленных в полусфере антенн в антенную решетку и направить ее

Таблица. Допустимые скорости передачи информации в многантенной ААР с помехоустойчивым кодированием турбокодом

Количество антенн в ААР	1	2	4	8	15	29	43
Индивидуальный доступ							
Скорость передачи информации, кбит/с	64	128	256	512	1024	2048	3072
Мощность на передачу АФАР	20	20	20	20	20	20	20
Мощность на передачу МКРЛ	20	40	80	160	300	580	860
Многостанционный доступ							
Скорость передачи информации, кбит/с	0,7	1,4	2,9	5,8	11	21	31
Мощность на передачу АФАР	20	20	20	20	20	20	20
Мощность на передачу МКРЛ	20	40	80	160	300	580	860

на СР. Тогда суммарная эффективная площадь антенн будет равна $N \cdot S_{\text{эфт}}$, где $S_{\text{эфт}}$ — эффективная площадь одной передающей антенны ОРКТ, и в соответствии с (4) коэффициент усиления антенной решетки из N антенн будет равен $G_{Nt} = N \cdot G_t$, а в соответствии с (5) скорость передачи информации может быть увеличена в N раз;

2) использовать N -канальную систему передачи на N несущих частотах через те же N передатчиков и N антенн, что приведет к тому же увеличению суммарной скорости передачи информации в N раз, не потребует дополнительных средств наведения антенной решетки ОРКТ на СР, но в N раз увеличит потребляемую мощность, что очень критично для бортовых систем, особенно для КА и РБ.

Очевидно, второй способ гораздо проще и надежнее, но требует большего энергопотребления кратно количеству используемых антенн.

Основной недостаток применения направленной антенной решетки для передачи телеметрии с ОРКТ состоит в том, что предполагает безотказность систем ориентации, стабилизации и управления абонентских РН/РБ/КА, иначе радиолиния РН/РБ/КА–СР работать не будет. Жесткое требование работоспособности основных бортовых систем справедливо при передаче целевой информации КА, но недопустимо при передаче с РН/РБ/КА телеметрической информации, которая является основой при идентификации неисправностей на борту РН/РБ/КА. Отказы или нарушения в работе систем управления, ориентации и/или стабилизации РН/РБ/КА отнюдь не редкое явление. Именно поэтому одно из основных требований к телеметрической радиолинии — способность ра-

ботать на ненаправленную антенну РН/РБ/КА. Однако многоканальная система имеет повышенное энергопотребление, что особенно критично для КА и РБ. Исходя из данных таблицы многоканальную ААР нецелесообразно применять при скоростях передачи данных свыше 256 кбит/с при работе с каналом индивидуального доступа спутника-ретранслятора и при скоростях свыше 3 кбит/с при работе с каналом многостанционного доступа спутника-ретранслятора.

Поэтому предлагается компромиссное трехступенчатое построение трехканальной ААР:

– в первом радиоканале ААР работает на одну антенну и передает в расчете на широкий луч спутника-ретранслятора в реальном масштабе времени со скоростью 700 бит/с минимально необходимое количество измерительной информации для встречи КА-абонента на территории России: вектор состояния на момент окончания динамической операции РН/РБ/КА и обобщенную информацию о состоянии систем РН/РБ/КА типа «нормане норма»;

– во втором радиоканале ААР работает на вторую антенну и передает в реальном масштабе времени со скоростью 64 кбит/с репортажную телеметрическую информацию, если спутнику-ретранслятору удалось узким лучом «захватить» КА-абонент;

– в третьем радиоканале ААР работает на АФАР и передает в реальном масштабе времени полный поток телеметрической информации с максимально предусмотренной скоростью, если с использованием данных системы управления о местоположении КА-ретранслятора, ОРКТ-абонента

и ориентации ОРКТ-абонента системе наведения АФАР ОРКТ-абонента удастся «поймать» КА-ретранслятор.

В соответствии с данными таблицы компромиссное трехступенчатое трехканальное построение ААР потребует суммарной излучаемой мощности радиосигналов 60 Вт и позволит в худшем случае гарантированно получить минимально необходимый объем измерительной информации для «встречи» ОРКТ-абонента на территории России с последующим получением телеметрии в записи, а в лучшем случае получить полный поток телеметрии о состоянии и местоположении КА-абонента в реальном масштабе времени. Такая реализация ААР удачно дополняет НАКУ и существенно повышает надежность информационно-телеметрического обеспечения выведения и управления КА.

Вывод

Применение трехступенчатой трехканальной абонентской аппаратуры ретрансляции наряду с АФАР надежно решает проблему передачи телеметрической информации с объекта ракетно-космической техники через спутник-ретранслятор

и является удачным дополнением НАКУ КА и измерений.

Список литературы

1. Гришмановский В. А., Степанов В. С. Расчет дальности, времени видимости КА и энергетических характеристик радиолиний для передачи телеметрической информации. Учебно-методическое пособие к практическим занятиям по курсу «Командно-измерительный комплекс управления». ВИКИ им. А. Ф. Можайского. 1985 г.
2. Энергетические характеристики космических радиолиний / Под ред. О. А. Зенкевича. М.: Сов. радио, 1972.
3. ОАО «НИИ КП». Создание абонентской аппаратуры ретрансляции многофункциональной космической системы ретрансляции «Луч». Пояснительная записка. Основные проектные решения и технические характеристики. Книга 1. 2013 г.
4. Министерство образования и науки Российской Федерации. Национальный исследовательский университет «МЭИ». Материалы эскизного проекта по составной части опытно-конструкторской работы «Исследование и расчеты радиолиний абонентской аппаратуры ретрансляции многофункциональной системы «Луч»». Москва, 2013 г.