

УДК 62-932.2 DOI 10.30894/issn2409-0239.2021.8.1.3.10

Тенденции совершенствования межспутниковой радиолинии системы ГЛОНАСС

Р. В. Бакитько, к. т. н., *otdelenie_74@spacecorp.ru*

АО «Российские космические системы», Москва, Российская Федерация

Д. А. Астахов, *otdelenie_74@spacecorp.ru*

АО «Российские космические системы», Москва, Российская Федерация

М. В. Моисеев, *moiseev.mv@spacecorp.ru*

АО «Российские космические системы», Москва, Российская Федерация

Р. Ф. Салахов, *otdelenie_74@spacecorp.ru*

АО «Российские космические системы», Москва, Российская Федерация

Аннотация. Рассматривается построение аппаратуры межспутниковых радиолиний (МРЛ) расширенной системы ГЛОНАСС следующего поколения, включающей высокоорбитальный космический комплекс (ВКК). Анализируются пути повышения энергетического потенциала и точностных характеристик в двух вариантах: совместимом и не совместимом с существующей системой.

Рассматриваются два этапа развития межспутниковых радиолиний. На первом этапе создается межспутниковая радиолиния с увеличенным на 8 дБ энергетическим потенциалом (среднескоростная), совместимая с действующей и обеспечивающая увеличение средней скорости передачи данных до 700 бит/с и уменьшение погрешности измерения псевдодалности до 10 см/с.

На втором этапе создается межспутниковая радиолиния с увеличенным на 16 дБ энергетическим потенциалом (высоко-скоростная), независимая от действующей и обеспечивающая увеличение средней скорости передачи данных до 20 000 бит/с и уменьшение погрешности измерения псевдодалности до 3 см/с.

Оба варианта реализуются на основе активной антенной фазированной решетки (АФАР). Обсуждается вопрос организации связи между навигационными космическими аппаратами с помощью узких лучей. Приводятся структурные схемы двух вариантов аппаратуры с АФАР в двух частотных диапазонах: *S* и *X*.

Ключевые слова: глобальные навигационные спутниковые системы, ГЛОНАСС, межспутниковая радиолиния, энергетический потенциал радиолинии

Trends to Improve the Inter-Satellite Radio Link of the GLONASS System

R. V. Bakit'ko, *Cand. Sci. (Engineering)*, *otdelenie_74@spacecorp.ru*

Joint Stock Company "Russian Space Systems", Moscow, Russian Federation

D. A. Astakhov, *otdelenie_74@spacecorp.ru*

Joint Stock Company "Russian Space Systems", Moscow, Russian Federation

M. V. Moiseyev, *moiseev.mv@spacecorp.ru*

Joint Stock Company "Russian Space Systems", Moscow, Russian Federation

R. F. Salakhov, *otdelenie_74@spacecorp.ru*

Joint Stock Company "Russian Space Systems", Moscow, Russian Federation

Abstract. The paper considers the construction of the inter-satellite radio links (ISRLs) hardware of the expanded next generation GLONASS system including the high-orbit space complex. Ways of increasing the energy potential and accuracy characteristics are analyzed in two variants: compatible and incompatible with the existing system.

Two stages of the ISRL development are considered. At the first stage the ISRL is created with power potential increased by 8 dB (medium-speed) compatible with the current one and providing an increase in the average data rate up to 700 bps and decrease of a pseudorange measurement error up to 10 cm/s.

At the second stage the ISRL is created with power potential (high-speed) increased by 16 dB independent of the current one and providing an increase in the average data rate up to 20,000 bps and decrease of a pseudorange measurement error up to 3 cm/s.

Both options are based on the active phased array antenna (APAR). The issue of organizing communication between navigation spacecraft using narrow beams is discussed. The structural diagrams of two hardware variants with the APAR in two frequency bands *S* and *X* are given.

Keywords: global navigation satellite systems, GLONASS, inter-satellite radio link, energy potential of a radio link

В системе ГЛОНАСС функционирует межспутниковая радиолиния (МРЛ), имеющая ограниченную пропускную способность и невысокую точность измерения межспутниковых расстояний — псевдодальностей. Актуальной является задача увеличения пропускной способности на порядок и снижения погрешности измерений в 3–4 раза [1] в условиях ограничения по излучаемой мощности. Этого можно достигнуть при увеличении энергопотенциала радиолинии в 6–8 раз. Единственный путь достижения этой цели — использование многоэлементных антенных систем с большим коэффициентом усиления, но с узкой диаграммой направленности.

В действующей МРЛ системы ГЛОНАСС средний измеренный по разным парам навигационных космических аппаратов (НКА) энергетический потенциал составляет 38 дБ/Гц. При таком энергетическом потенциале обеспечена средняя скорость передачи данных около 100 бит/с и погрешность измерения псевдодальности 30 см/с.

Рассматриваются два этапа развития МРЛ.

На первом этапе создается МРЛ с увеличенным на 8 дБ энергетическим потенциалом (средне-скоростная), совместимая с действующей и обеспечивающая увеличение средней скорости передачи данных до 700 бит/с или в импульсном режиме передачи при скважности 5 (кратковременная) — 3500 бит/с и уменьшение погрешности измерения псевдодальности до 10 см/с.

На втором этапе создается МРЛ с увеличенным на 16 дБ энергетическим потенциалом (высокоскоростная), независимая от действующей и обеспечивающая увеличение средней скорости передачи данных до 20 000 бит/с и уменьшение погрешности измерения псевдодальности до 3 см/с.

В действующей МРЛ используются достаточно эффективные помехоустойчивое кодирование и алгоритм измерения навигационных параметров. Поэтому остается только путь увеличения энергетического потенциала. Причем достигнуть этого необходимо без увеличения энергетических затрат. На первом этапе необходимо увеличить энергетический потенциал до 46 дБ/Гц и на втором этапе — до 54 дБ/Гц.

Энергетический потенциал (дБ) радиолинии определяется известным выражением [2]:

$$H = P_{\text{пер}} + G_{\text{пер}} + G_{\text{прм}} - L_{\text{потерь}} - N_0 + L_{\text{распр}}. \quad (1)$$

Далее для сокращения вводится параметр PG , характеризующий эквивалентную мощность с учетом коэффициентов усиления передающей и приемной антенн:

$$PG = P_{\text{пер}} + G_{\text{пер}} + G_{\text{прм}}. \quad (2)$$

Для обеспечения задаваемого порогового потенциала H_n он должен быть равен:

$$PG = H_n + L_{\text{потерь}} + N_0 - L_{\text{распр}}. \quad (3)$$

При $N_0 = -204$ дБ/Гц и $L_{\text{потерь}} = 2$ дБ

$$PG = H_n - 202 \text{ дБ/Гц} - L_{\text{распр}}, \quad (4)$$

$$L_{\text{распр}} = (\lambda/4D)^2,$$

где D — расстояние между КА (м),

λ — длина волны (м).

В табл. 1 приведены требуемые значения PG для двух значений H_n при $D = 4,71 \cdot 10^7$ м для трех значений длины волны λ .

Таблица 1. Требуемые значения PG

H_n	$\lambda_1 = 1,36 \times 10^{-1}$ м	$\lambda_2 = 3,75 \times 10^{-2}$ м	$\lambda_3 = 2,00 \times 10^{-2}$ м
46 дБ/Гц	+39,8 дБ	+51,0 дБ	+56,5 дБ
54 дБ/Гц	+47,8 дБ	+59,0 дБ	+64,5 дБ

Для сопоставления: в действующей МРЛ $PG = 26,5$ дБ, что соответствует результатам летных испытаний [1]. Ширина диаграммы $\Delta\theta$ и диаметр d антенн, имеющих требуемое значение коэффициента усиления при одинаковых приемной и передающей антеннах ($G_{\text{пер}} = G_{\text{прм}}$), рассчитаны по формулам [2]:

$$\Delta\theta = \sqrt{\frac{30\,000}{G}}, \quad (5)$$

$$d = \frac{\lambda}{\pi} \cdot \sqrt{2G}. \quad (6)$$

Мощности передатчиков для каждого значения длины волны приняты разными в соответствии с реализуемостью на отечественной электронно-компонентной базе (ЭКБ).

Таблица 2. Параметры антенн

Параметр	$\lambda_1 = 1,36 \times 10^{-1}$ м	$\lambda_2 = 3,75 \times 10^{-2}$ м	$\lambda_3 = 2,00 \times 10^{-2}$ м
Мощность $P_{\text{пер}}$, дБВт	19	16	13
Коэффициент усиления G , дБ	10,4/14,4	17,5/21,5	21,8/25,8
Ширина диаграммы $\Delta\theta$, °	55,0/28,0	20,6/11,5	15,2/8,5
Диаметр d , м	0,19/0,33	0,14/0,25	0,10/0,18

Результаты расчета приведены в табл. 2 для значений $H_{\text{п}} = 46$ дБ/54 дБ.

Из табл. 2 следует, что во всех диапазонах диаграмма направленности оказывается уже пределов изменения углов визирования НКА, которые в группировке ГЛОНАСС достигают 160° . Это означает, что надо устанавливать несколько антенн либо наводить антенну. В случае использования управляемых антенн предпочтение надо отдать диапазону Ku . Антенна меньше, а необходимая точность наведения антенны при ширине диаграммы направленности 7° составляет около 2° , что реализуемо.

Далее обсуждаются два варианта построения МРЛ: среднескоростной с энергетическим потенциалом 46 дБ и высокоскоростной — с потенциалом 54 дБ.

Среднескоростной вариант совместим с действующей МРЛ и является ее развитием. Как показано в [1], каждый НКА должен взаимодействовать с другими НКА группировки в пределах $30\text{--}90^\circ$ относительно направления на центр Земли (ось X НКА) и 360° — в горизонтальной плоскости. В действующей МРЛ этот сектор перекрывается приемной и передающей антеннами с усилением в максимуме при $\beta = 40^\circ$ 4,5 дБ каждая, т. е. $G_{\text{пер}} + G_{\text{прм}} = 9$ дБ.

Для получения произведения коэффициентов усиления передающей и приемной антенн в том же секторе 20,8 дБ (см. табл. 2) необходимо либо увеличить усиление каждой на 5,9 дБ, либо увеличить усиление только приемной антенны до значения 16,3 дБ. Последнее реализовать проще, используя несколько отдельных приемных антенн.

Коэффициент усиления антенны связан с шириной диаграммы направленности по двум сечениям $\Delta\theta_1$ и $\Delta\theta_2$ приблизительным соотношением [2]

$$G = \frac{30\,000}{\Delta\theta_1 \cdot \Delta\theta_2}. \quad (7)$$

К примеру, антенна действующей МРЛ имеет: $\Delta\theta_1 = 30^\circ$, $\Delta\theta_2 = 360^\circ$.

Соответственно из (7) имеем: $G_1 = 2,8$ (4,5 дБ), что совпадает с реальным значением.

Если вместо одной 360 -градусной приемной антенны установить N приемных антенн с шириной диаграммы $360/N$, перекрывающих тот же сектор, то каждая антенна в своем секторе будет иметь усиление $N \cdot G_1$.

Сигналы антенн нельзя суммировать, а необходимо каждый обрабатывать отдельным приемником. Для передающей антенны такой подход невозможен, так как придется устанавливать N передатчиков, что на практике нереализуемо.

На этой основе построена представленная ниже модификация МРЛ-С для нового поколения НКА ГЛОНАСС (с КА «Глонасс-К2-М» № 27):

– прием/передача с временным разделением на одной несущей частоте 2212,5 МГц.

Переключение режима производится по жесткой временной циклограмме. Рассматриваются две циклограммы для каждого НКА:

- 1) 5 с — передача, 15 с прием (20 с) как в БАМИ для работы со «старыми» НКА;
- 2) 3 с — передача, 9 с прием (12 с); при работе новых НКА;

– прием каждым НКА одновременно всех излучающих НКА в углах $37\text{--}90^\circ$ относительно направления на центр Земли (оси X);

– скорость передачи данных:

- 1) между «новыми» НКА — 700 бит/с средняя (кратковременная 3500 бит/с);
- 2) между «новым» и «старым» НКА — 100 бит/с (кратковременная 500 бит/с);

– погрешность измерения псевдодальности между «новыми» НКА — 5 см (СКО);

– антенная система:

- 1) на передачу всенаправленная (аналогичная БАМИ);

- 2) на прием 6-лучевая 25-элементная активная антенная фазированная решетка (АФАР), формирующая одновременно 6 лучей для слежения за 6 излучающими НКА, с усилением каждого луча 16,5 дБ (рис. 1).

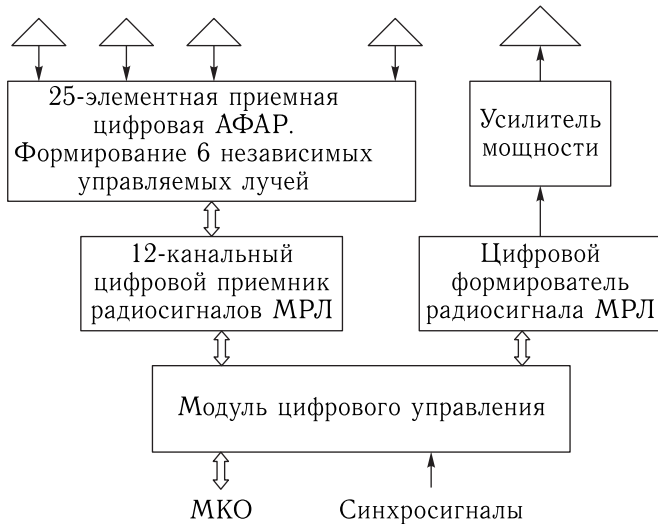


Рис. 1. Структурная схема БА МРЛ-С

Передающий тракт содержит цифровой формирователь межспутникового радиосигнала, усилитель мощности и антенну. Выходная мощность усилителя мощности — 80 Вт.

Приемный тракт содержит цифровую 25-элементную АФАР, формирующую 6 независимых лучей и 12-канальный приемник для непрерывного сопровождения всех «видимых», включая неизлучающие, НКА.

Здесь предложен вариант конфигурации антенны — коническая кольцевая поверхность с углом 40–45° с двумя поясами излучателей по 15 и 10 штук. Возможны и другие решения, но это представляется простым в реализации (рис. 2).

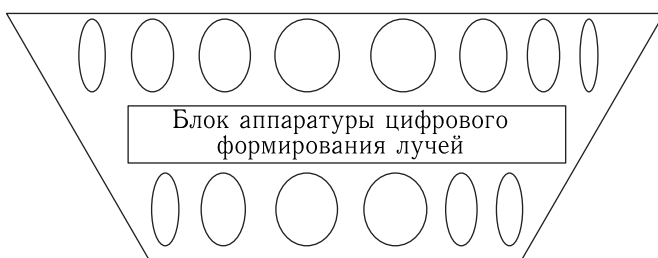


Рис. 2. Схематическое изображение АФАР

Антенные элементы — цилиндрические спиральные с шириной диаграммы направленности $40 \times 60^\circ$ и усилением 10,5 дБ.

Структурная схема блока цифрового формирования лучей приведена на рис. 3.

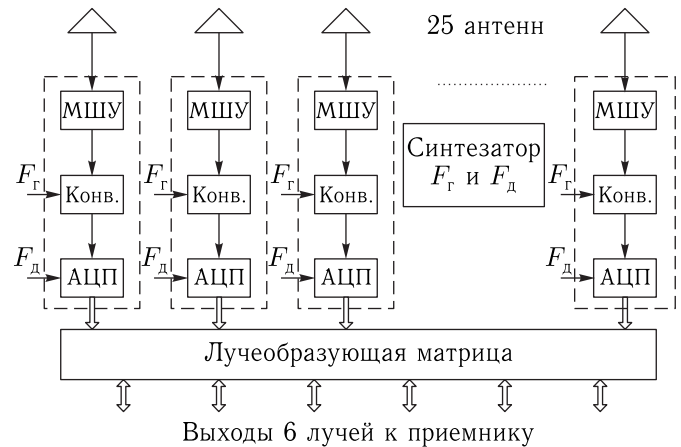


Рис. 3. Структурная схема блока цифрового формирования лучей

Каждый луч формируется четырьмя соседними излучателями с коэффициентом усиления около 10,5 дБ каждый. Коэффициент усиления каждого луча (собственно антенны) 16,3 дБ по половинной мощности. Максимум усиления — при угле 37–40°. В направлении оси антенна должна ослаблять сигнал на 12–15 дБ.

Структурная схема лучеобразующей матрицы приведена на рис. 4.

Лучи управляются переключениями в мультиплексоре и изменением амплитудно-фазового распределения внутри каждой четверки. Рассмотрен-

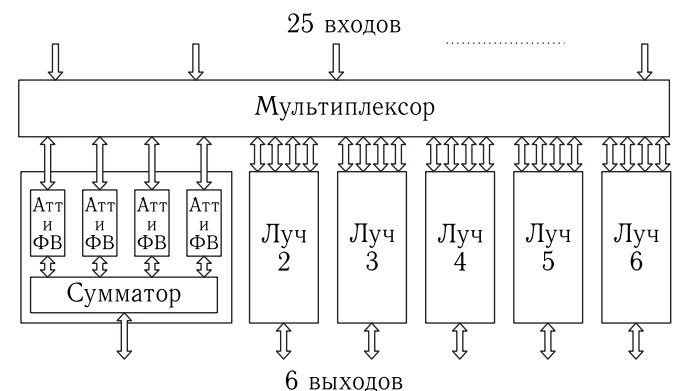


Рис. 4. Структурная схема лучеобразующей матрицы

ный вариант решает задачу первого этапа: обеспечивается энергопотенциал радиолинии 46 дБГц между новыми НКА и совместимость с действующей МРЛ с энергопотенциалом 38 дБГц.

Задача создания МРЛ второго этапа решается на основе антенн с узкими диаграммами направленности и частотным разделением приемника и передатчика (дуплексный режим). Рассматривается МРЛ в двух диапазонах частот: X и Ku . Диаграммы узкие, поэтому возникает необходимость наводить антенны на абонента. Одновременно надо работать с несколькими НКА, следовательно, для каждого, с которым организуется взаимодействие, нужна отдельная антенна или отдельный луч. Естественно возникает задача минимизации количества лучей.

Дуплексный режим работы взаимодействующих НКА позволяет измерять дальность запросным методом в реальном времени. Это увеличивает оперативность МРЛ и значительно разгружает канал передачи данных по сравнению с беззапросным методом (как в БАМИ). Но возникают два вида НКА, которые различаются частотами приема и передачи. НКА1 передает на частоте f_1 и принимает на частоте f_2 , а НКА2 передает на частоте f_2 и принимает на частоте f_1 . Взаимодействовать могут только разные виды НКА. Это обстоятельство ограничивает возможности связи НКА. Однако такое решение облегчает задачу частотной координации в Международном союзе электросвязи (МСЭ) и упрощает конструкцию аппаратуры (фильтры развязки между приемным и передающим трактами).

Структура связей в группировке дана на рис. 5. Каждый НКА может взаимодействовать с 4 НКА в своей плоскости и с 2 НКА других плоскостей. Для этого каждый НКА должен иметь 6 управляемых антенн или АФАР, формирующую 6 управляемых лучей. Количество лучей можно сократить до 4, но тогда придется работать поочередно с некоторыми НКА. Такое решение берется далее за основу.

Основные характеристики МРЛ с узкими управляемыми диаграммами направленности и дуплексным режимом работы:

- время доставки информации о целостности — 5 с с вероятностью не менее 0,99;

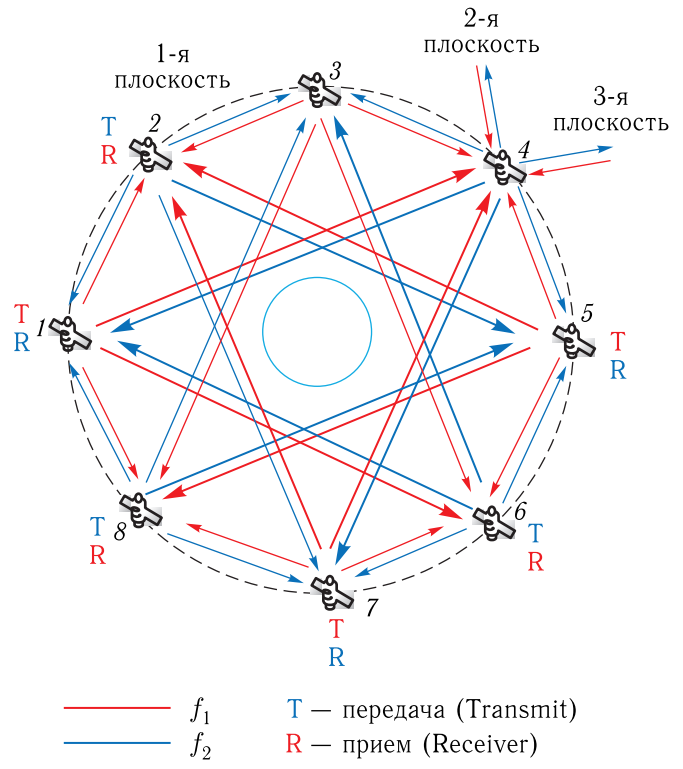


Рис. 5. Структура связи между НКА с частотным разделением с двумя рабочими частотами

- непрерывная передача и прием на любой из частот — $f_1 = 8000$ МГц и $f_2 = 8500$ МГц (предварительно);

- двусторонняя непрерывная связь любого КА одновременно не менее чем с 4 НКА в углах места относительно оси X $37-90^\circ$;

- скорость передачи данных не менее 10 000 бит/с;

- запросные измерения межспутниковых расстояний вместо псевдодальностей в реальном времени с погрешностью:

- 1) кодовых не хуже 3 см (СКО);
- 2) по фазе несущей не хуже 1 см (СКО);

- отсутствие механически перемещающихся частей.

Такая МРЛ несовместима с функционирующей в настоящее время БАМИ.

Из табл. 1 следует, что для получения энергопотенциала 54 дБГц в диапазоне X необходимо иметь $PG = 59,0$ дБВт.

Предварительные характеристики плоской АФАР, полученные на модели:

- число активных элементов 12×8 ,
- перекрываемый рабочий сектор $\pm 45^\circ$ относительно нормали,
- коэффициент усиления в секторе не менее 23,5 дБ,
- излучаемая мощность не менее 15 дБВт.

Таким образом, рассматриваемая АФАР обеспечивает получение $PG = 62,0$ дБВт, что на 3 дБ больше, чем необходимо.

Структура бортового радиокомплекса с АФАР приведена на рис. 6.

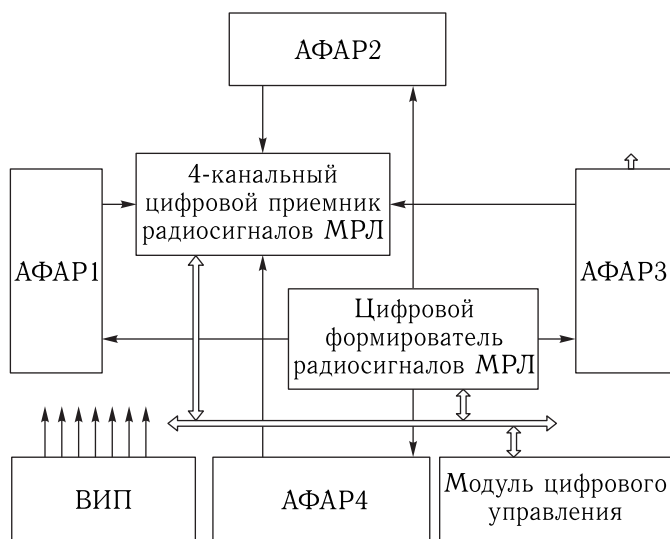


Рис. 6. Структура бортового радиокомплекса с АФАР

В состав радиокомплекса входит приемно-формирующее устройство (ПФУ) МРЛ высокоорбитального космического комплекса (ВКК), включающее цифровой приемник ЦПРМ, цифровой формирователь радиосигнала (ЦФРС) и четыре отдельные АФАР, развернутые под 90° по азимуту, каждая перекрывающая свой сектор не менее чем на 100° . По углу места плоскости АФАР отклонены от оси X КА на 40° и перекрывают сектор, в котором могут находиться НКА, с большим запасом.

Каждая АФАР в своем секторе формирует управляемый приемно-передающий луч шириной около 10° . Таким образом, любой КА может взаимодействовать с другими 4 КА.

Прием и передача производятся на разных частотах в двух комбинациях (частотных литерах), задаваемых по программе или по команде с Земли:

Л1 — f_1 прием, f_2 передача;

Л2 — f_1 передача, f_2 прием.

Приемник ЦПРМ содержит 4 независимых канала по числу АФАР. Каждый канал может принимать сигналы с разными кодами до 6 по номерам КА.

Цифровой формирователь радиосигналов синтезирует четыре радиосигнала для 4 АФАР.

Радиосигналы содержат две ортогональные компоненты, модулированные разными ПСП и цифровой информацией со скоростью не менее 10 кбит/с на каждой.

Структурная схема АФАР приведена на рис. 7.

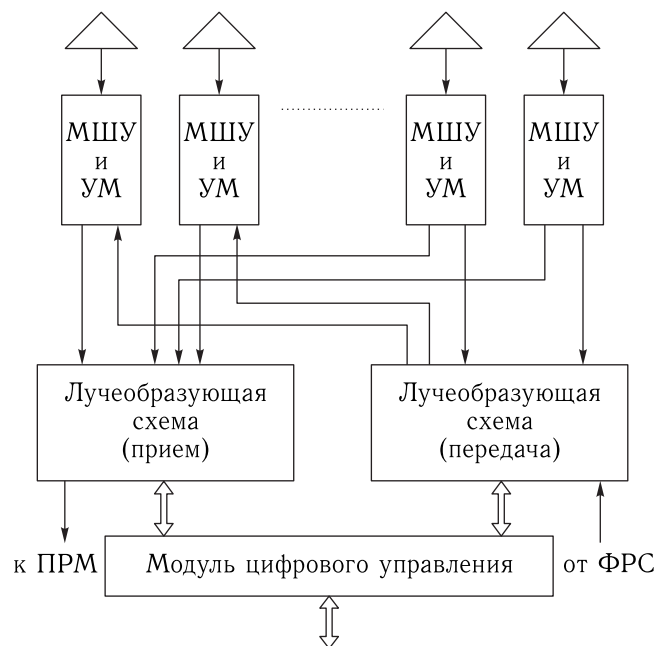


Рис. 7. Структурная схема АФАР

Параметры АФАР:

- ЭИИМ — 38,5 дБВт,
- эквивалентная спектральная плотность шума приемника — -204 дБВт/Гц,
- коэффициент усиления приемной АФАР — 23,5 дБ,
- потребляемая мощность — 130 Вт,
- габариты $250 \times 160 \times 100$ мм,
- масса 6,0 кг.

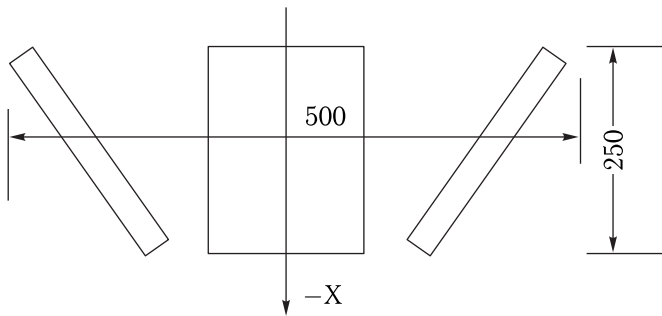


Рис. 8. Эскиз размещения АФАР на КА

Блоки АФАР размещаются на КА относительно оси X, направленной к центру Земли, согласно рис. 8.

МРЛ высокоорбитального космического комплекса ГЛОНАСС (МРЛ ВКК)

Параметры орбит высокоорбитальных космических аппаратов (ВКА) приведены в табл. 3.

Таблица 3. Параметры орбит высокоорбитальных космических аппаратов

Номер	$\Omega, ^\circ$	$\omega_\pi, ^\circ$	$i, ^\circ$	$a, \text{ км}$	e	$u, ^\circ$
1	130,03	270	64,8	42 164,14	0,072	0
2	130,03	270	64,8	42 164,14	0,072	295,09
3	250,03	270	64,8	42 164,14	0,072	226,27
4	250,03	270	64,8	42 164,14	0,072	163,72
5	10,03	270	64,8	42 164,14	0,072	108,94
6	10,03	270	64,8	42 164,14	0,072	56,52

Орбиты ВКА почти круговые, поэтому можно применить такой же принцип построения антенных систем МРЛ с учетом масштабного коэффициента M , учитывающего отношение расстояний в космических группировках ГЛОНАСС и ВКК. Действительно, отношение $D/\cos\beta$, которое у круговых орбит постоянно, здесь незначительно меня-

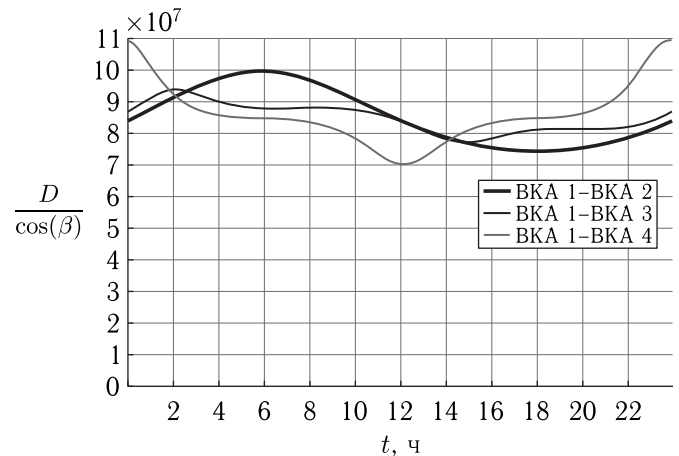


Рис. 9. Отношение дальности к косинусу угла места для ВКА 1-ВКА 2, ВКА1-ВКА 3, ВКА 1-ВКА 4

ется при движении по орбитам, что иллюстрируется на рис. 9.

Удобно ввести масштабный коэффициент M , равный:

$$M = r_{\text{гл}}/a = 0,6 \text{ или } M = -2,2 \text{ дБ,}$$

где $r_{\text{гл}}$ – радиус орбиты НКА ГЛОНАСС, a – апогей орбиты НКА ВКК.

Таким образом, при тех же параметрах аппаратуры энергопотенциал межспутниковой радиолинии ВКК будет на 2,2 дБ меньше.

Информационные характеристики радиолиний приведены в табл. 4.

Таблица 4. Информационные характеристики радиолиний

Радиолиния	Энергетический потенциал, дБ/Гц	Скорость передачи (средняя), бит/с
Среднескоростная	43,8	400
Высокоскоростная	51,8	12 000

МРЛ между космическими группировками ГЛОНАСС и ВКК

На рис. 10 представлено взаимное положение КА двух группировок.

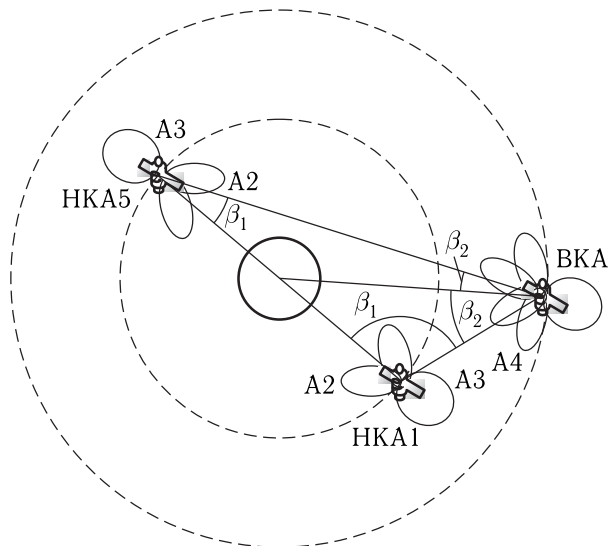


Рис. 10. Взаимное положение КА двух группировок

Углы визирования β_1 и β_2 в разных направлениях оказываются разными. Угол β_1 меняется в пределах 360° . Следовательно, антенная система

НКА в этой радиолинии должна быть другой. Использование с целью унификации тех же антенн ограничит время до 20–30% от общего времени взаимной видимости. В настоящее время обсуждается, достаточно ли этого или необходимо устанавливать на НКА дополнительную антенную систему.

Список литературы

1. Научно-технический отчет о НИР «Исследование вопросов совершенствования бортовой аппаратуры перспективного КА среднеорбитального сегмента ГЛОНАСС и развития функциональных дополнений системы ГЛОНАСС и ассистирующих технологий в интересах повышения тактико-технических характеристик системы ГЛОНАСС». Шифр «Развитие-РКС-ЭЗ», 2014. 226 с.
2. Антенны УКВ: В 2-х частях Часть 1 / Г.З. Айзенберг, В.Г. Ямпольский, О.Н. Терешин; под общей редакцией Г.З. Айзенберга. М.: Связь. 1977. 381 с.