

Принципы реализации сети спутниковой связи стандарта DVB-RCS с пространственно-частотно-временным разделением ресурса на основе многолучевых АФАР X-диапазона

Генов А.А.^{1*}, Осипов В.В.^{2}, Савилкин С.Б.^{2***}**

¹*Корпорация «Комета», ул. Велозаводская, 5, Москва, 115280, Россия,*

²*Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет), МАИ, Волоколамское шоссе, 4, Москва, А-80, ГСП-3, 125993, Россия*

**e-mail: ovv_42@mail.ru*

***e-mail: kt-mati@mail.ru*

****e-mail: savilkin@mail.ru*

Аннотация

Применение стандарта DVB-RCS позволяет существенно расширить функциональные характеристики спутниковых сетей мобильной связи. Для перехода к более высоким скоростям передачи информации, принятым в сетях спутниковой связи стандарта DVB-RCS, необходимо более чем на порядок увеличить энергетические характеристики спутниковых радиолиний современных космических аппаратов (КА).

В статье рассматриваются методы увеличения энергетического потенциала радиолиний КА путем создания на их борту многолучевых приемно-передающих антенн (МЛА) X-диапазона.

Ключевые слова: многолучевые приемно-передающие антенны, мобильная связь, распределенные ресурсы, DVB-RCS.

1. Введение

Спутниковые сети мобильных земных станций (ЗС) реализуются в настоящее время через КА на геостационарной орбите (ГСО), как правило, в режиме прямой ретрансляции с частотным разделением каналов (FDMA).

Переход к стандарту DVB-RCS [1] с пространственно-частотно-временным разделением каналов (MSF-TDMA), предполагает реализацию на борту КА многолучевых приемно-передающих антенн (гибридных МЛА или АФАР) и мультисервисных бортовых цифровых платформ (МБЦП) стандарта DVB-RCS, обеспечивающих многоканальную демодуляцию сигналов ЗС [2, 3, 4, 5].

Использование стандарта DVB-RCS с MSF-TDMA позволяет существенно расширить функциональные характеристики сетей мобильной связи через КА на ГСО.

В качестве прототипа при рассмотрении вопросов создания мобильной сети спутниковой связи стандарта DVB-RCS с MSF-TDMA используется развернутая в настоящее время в X-диапазоне сеть носимых ЗС, работающих в режиме прямой ретрансляции с частотным разделением каналов FDMA. ЗС в данной сети, несмотря на достаточно высокие функциональные и энергетические характеристики, для обеспечения прямой телефонной связи друг с другом вынуждено работают на минимально возможных (вокодерных) скоростях передачи информации.

Модернизация КА путем введения в состав КА МЦБП и МЛА позволит реализовывать в X-диапазоне на базе ЗС, сети мобильной спутниковой связи

стандарта DVB-RCS (MSF-TDMA), в которых будет обеспечиваться возможность организации высокоскоростной прямой связи абонентских ЗС друг с другом.

2. Вариант модернизации КА путем установки на его борту приемно-передающей МЛА и МБЦП

Зона обслуживания КА, обеспечивающая работу сети носимых ЗС в режиме FDMA, представляет собой эллипс, вытянутый с Запада на Восток, и перекрывающий практически всю Европейскую часть РФ.

Используя в качестве многолучевой приемно-передающей антенны на борту КА многолучевую приемно-передающую АФАР в X-диапазоне с размерами порядка 1,4м x 0,7м и шириной луча порядка $3,5^\circ \times 1,75^\circ$ мобильная сеть спутниковой связи стандарта DVB-RCS с MSF-TDMA может быть обеспечена 8-ми фиксированными в пространстве приемными лучами и одним перенацеливаемым по зоне обслуживания передающим лучом АФАР практически на всей населённой территории РФ.

Предлагаемая АФАР должна иметь 8 фиксированных по зоне обслуживания лучей в диапазоне 8ГГц и один перенацеливаемый луч в диапазоне 7ГГц. Время перенацеливания передающего луча порядка 1мсек, период перенацеливания порядка 15мсек, время полного обзора зоны обслуживания порядка 0,125сек. Число приемно-передающих модулей (излучателей) АФАР порядка 512.

Общая структура приемно-передающего тракта КА с многолучевой приемно-передающей АФАР и МБЦП представлена на рис 1.

Сигналы MSF-TDMA от каждого из 512 приемных модулей поступают на каналные приемники (ПРМ $1 \div 512$), где после предварительного усиления на

несущей частоте, переносятся на 1-ю промежуточную частоту (ПЧ) и дополнительно усиливаются на 1-й ПЧ. Далее сигналы с выходов ПРМ (1÷512) поступают на делители на 8 (по числу приемных лучей), а затем на 8 диаграммообразующих схем (ДОС) приемного тракта, где переносятся на 2-ую промежуточную частоту и дополнительно усиливаются на 2-й ПЧ.

В ДОС (1÷8) во взаимодействии с МБЦП осуществляются также:

- обмен с МБЦП по межмашинным каналам обмена (МКО) телеметрической информацией (ТМИ) и командами управления (КУ);

- расчет по командам МБЦП амплитудно-фазового распределения (АФР) в раскрыве АФАР, формирующего заданный приемный луч АФАР;

- выдача на фазовращатели и аттенюаторы, установленные в каждом из 512 каналов приема, команд для реализации заданного АФР;

- выдача в МБЦП телеметрической информации о состоянии каналов приема и фактически реализованном АФР в раскрыве АФАР;

- передача в МБЦП сигналов MSF-TDMA, поступивших от ЗС в заданном приемном луче АФАР.

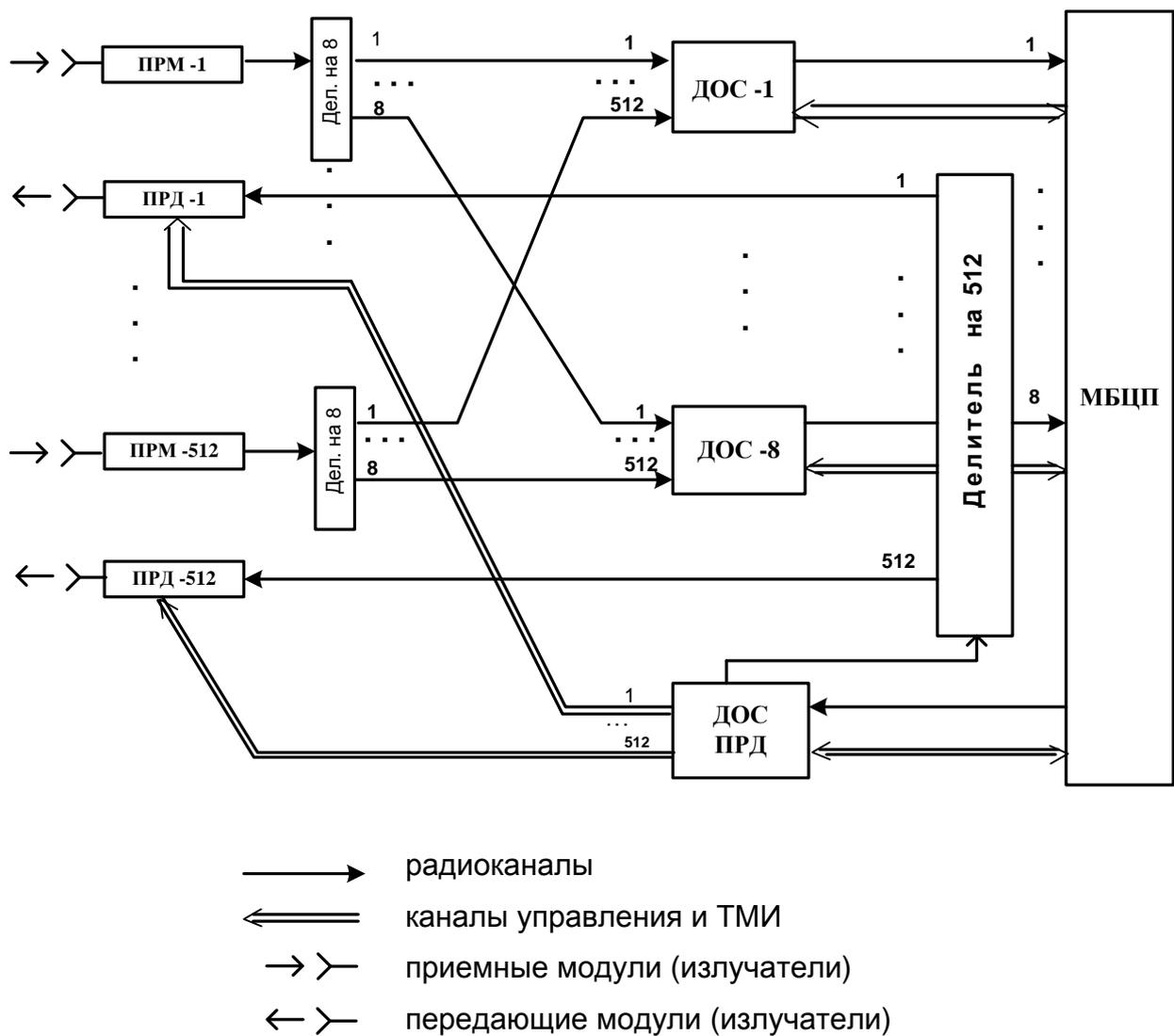


Рис.1 Общая структура приема-передающего тракта КА с многолучевой приемно-передающей АФАР и МБЦП.

В передающем тракте (ПРД) групповой видео-сигнал ТДМА, сформированный МБЦП, поступает на ДОС ПРД, где преобразуется в радиосигнал на несущей частоте передачи АФАР, усиливается до заданного уровня и синфазно распределяется на все 512 канальных передатчиков ПРД ($1 \div 512$).

В ДОС ПРД во взаимодействии с МБЦП осуществляется также:

- обмен с МБЦП по МКО информацией ТМИ и командами КУ;

- расчет по командам МБЦП АФР в раскрыве АФАР, обеспечивающего перенацеливание передающего луча в заданный район зоны обслуживания;
- выдача на фазовращатели и аттенюаторы, установленные в каждом из канальных передатчиков ПРД (1÷512) команд для реализации заданного АФР;
- выдача в МБЦП ТМИ о состоянии каналов передачи и фактически реализованном АФР в раскрыве АФАР;
- периодичная по командам МБЦП нормировка АФР относительно эталонного АФР, заданного для формирования передающего луча по нормали к плоскости раскрыва АФАР;
- последовательное перенацеливание по командам МБЦП передающего луча АФАР на 1÷8 зоны обслуживания.

Энергетический потенциал спутниковых радиолиний КА с приемо-передающей АФАР при мощности канальных передатчиков ПРД (1÷512) порядка 0,25 Вт и температуре шума ($T_{ш}$) канальных приемников ПРМ (1÷512) порядка 200°С составит:

-ЭИИМ ($P_{пер} \times G_{пер}$) - 58 дБ Вт;

-Добротность ($G_{пр} / T_{ш}$) - 14 дБ;

что на порядок выше соответствующих характеристик действующих КА.

3. Структура МБЦП стандарта DVB-RCS с пространственно-частотно-временным распределением ресурса MSF-TDMA.

На вход МБЦП от ДОС (1÷8) приемного тракта (ПРМ) по 8 каналам на второй промежуточной частоте поступают групповые сигналы с MSF-TDMA от сети ЗС по каждой из 8-ми зон обслуживания.

В МБЦП сигналы, поступившие по каждому из 8-ми каналов, селективируются по частоте, декодируются, демодулируются канальными цифровыми приемными линейками (ЦПЛ) и передаются для логической обработки в центральный бортовой процессор (ЦБП) МБЦП.

ЦБП осуществляет селекцию служебных и информационных сигналов, поступивших от ЗС по всем 8-ми приемным лучам и формируют групповой видеосигнал (ГВС) ТДМА для передачи на ЗС. В состав ГВС ТДМА входят:

- пилот сигнал (ПС) для синхронизации работы ЗС по зоне обслуживания;
- информация управления для идентификации частотно-временного положения информационных пакетов для каждой из ЗС сети, выделенных ей в составе группового сигнала MSF-TDMA на линии Земля-борт и в составе группового сигнала борта с ТДМА на линии Борт-Земля;
- собственно информационные пакеты для ЗС сети.

Общая структура МБЦП стандарта DVB-RCS с MSF-TDMA представлена на рис 2.

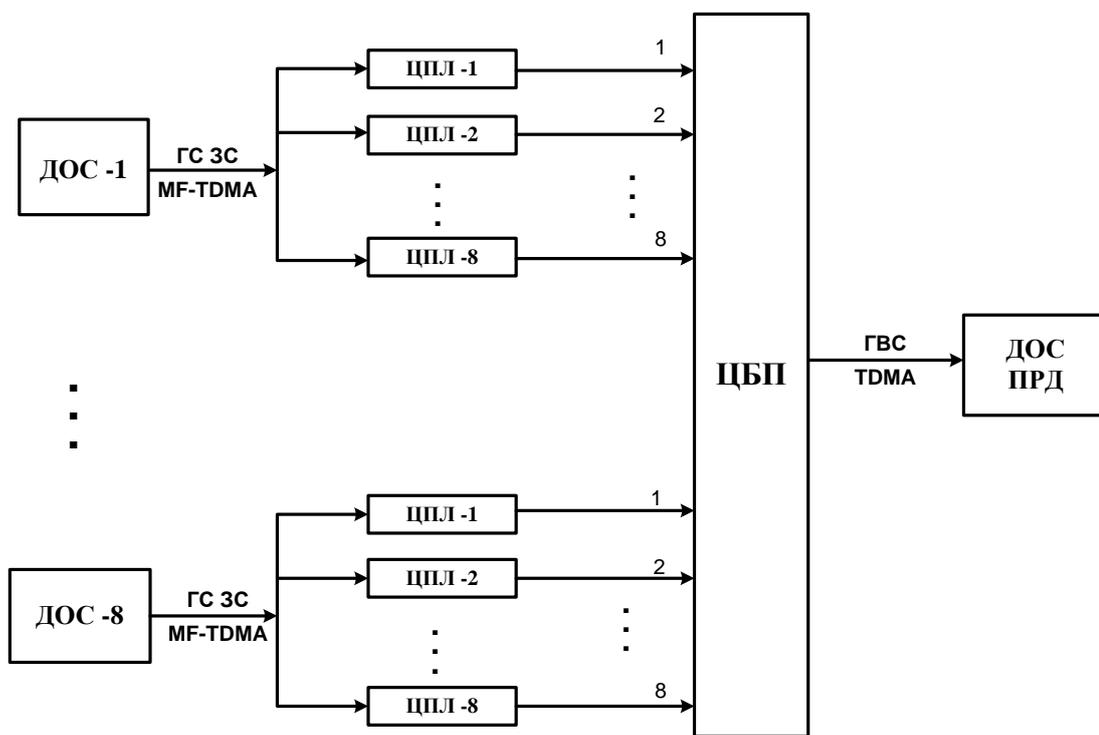


Рис.2 Общая структура МБЦП стандарта DVB-RCS с MSF-TDMA.

Каждая цифровая приемная линейка (ЦПЛ) выделяет на фиксированной частоте в полосе приема данного луча одну несущую на 2-й ПЧ со скоростью передачи информации 512 кбит/с, в которой уплотнены по времени 32 канала по 16 кбит/с.

Всего в одном луче от ЗС данной зоны обслуживания может быть одновременно принято до 8 каналов по 512 кбит/с (64 канала по 64 кбит/с, 128 каналов по 32 кбит/с или 256 каналов по 16 кбит/с).

Общая пропускная способность приемного тракта составляет соответственно 32,768 Мбит/с.

Служебная информация (запросы на регистрацию в сети, запросы на выделение ресурса и т.д.) от всех ЗС, работающих в сети, может передаваться в первых каналах 16 кбит/с в составе каждого из групповых сигналов 512 кбит/с.,

поступающих в МБЦП. Занятость служебных каналов определяется ЦБП на соответствующих служебных временных позициях группового сигнала TDMA, передаваемого по линии борт-Земля в каждую зону обслуживания сети.

В составе ГВС с TDMA формируемого ЦБП уплотняются: пилот сигнал, информация управления и информационные пакеты данных, которые сбрасываются по линии борт-Земля на каждую зону обслуживания в течении 14 мсек с периодом обзора всей зоны обслуживания 0,125 сек.

Скорость передачи информации передающего тракта на линии борт-Земля выше общей пропускной способности приемного тракта на 4,096Мбит/с и составляет соответственно 36,864 Мбит/с., что позволяет компенсировать потери, связанные циклическим обзором зоны обслуживания и временем необходимым для перенацеливания передающего луча АФАР.

4. Вариант модернизации ЗС для обеспечения работы в мобильных сетях спутниковой связи стандарта DVB-RCS с MSF-TDMA.

Приемно-передающая антенна ЗС представляет собой однолучевую приемно-передающую АФАР в X-диапазоне с ЭИИМ и добротностью, достаточной для обеспечения работы ЗС в МССС стандарта DVB-RCS с MSF-TDMA. Недостатком данной АФАР является только то, что она не обеспечивает электронного управления лучом, а наведение луча на КА осуществляется вручную.

Модернизации должна быть подвергнута также аппаратура передающего тракта для обеспечения непрерывной работы в режиме MSF-TDMA и приемного

такта для обеспечения дискретной (с периодом обзора зоны обслуживания 0,125 сек) работы в режиме ТДМА.

Учитывая, что в каждый конкретный момент ЗС работает в каком-то одном из фиксированных приемных лучей АФАР КА, фактически в передающем тракте ЗС может быть реализован стандартный режим работы ЗС в сетях стандарта DVB-RCS с MF-TDMA. Аналогично в приемном тракте может быть реализован стандартный режим работы ЗС с TDMA на интервалах засветки заданного района обслуживания (14 мсек.) с периодом с повторения интервалов засветки 125 мсек.

Общая структура модернизированной ЗС представлена на рис. 3.

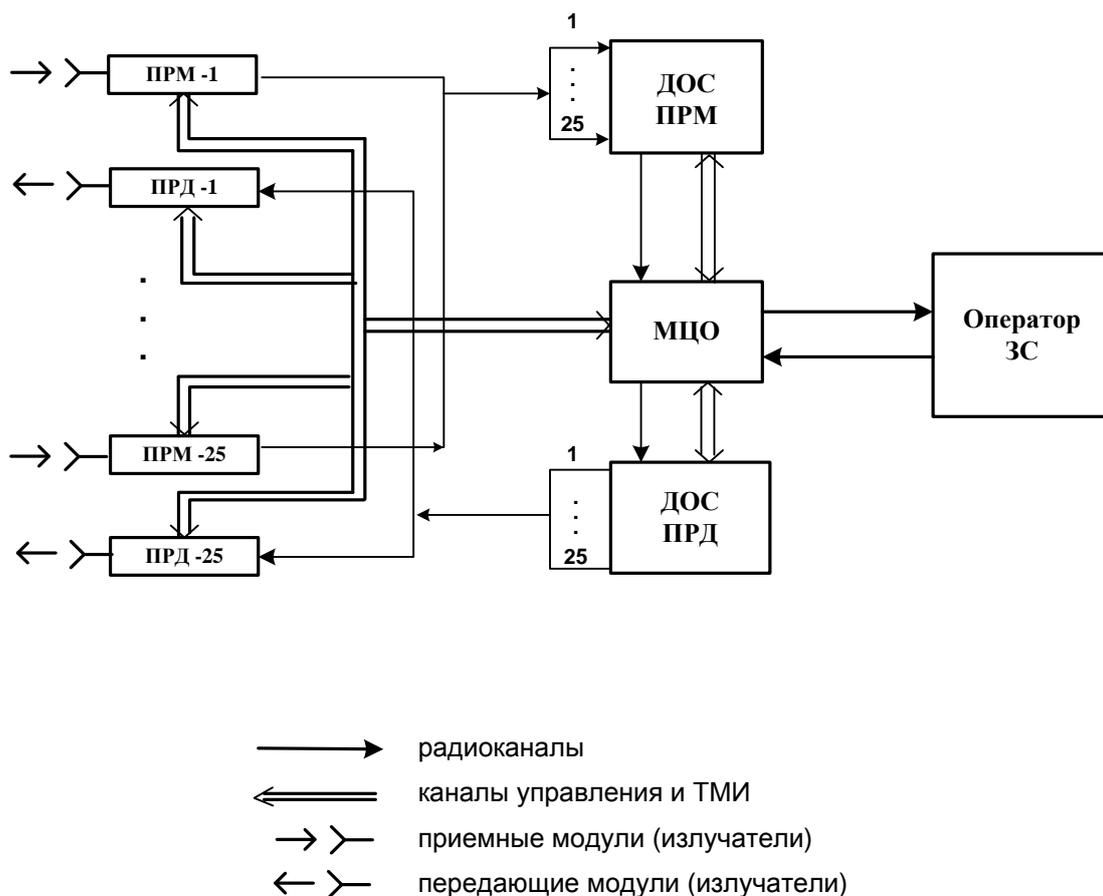


Рис. 3 Общая структура модернизированной ЗС .

В модернизированной ЗС предполагается использовать фрагмент бортовой АФАР с размерами порядка 22см x 22см и шириной луча порядка 10°.

Сигналы TDMA от каждого из 25 приемных модулей поступают на каналные приемники (ПРМ 1÷25), где после предварительного усиления на несущей частоте, переносятся на 1-ю промежуточную частоту (ПЧ) и поступают на диаграммообразующую схему приемного тракта (ДОС ПРМ), где переносятся на 2-ую промежуточную частоту и дополнительно усиливаются на 2-й ПЧ.

В ДОС ПРМ во взаимодействии с модулем цифровой обработки (МЦО) осуществляются также:

- обмен с МЦО по межмашинным каналам обмена (МКО) телеметрической информацией (ТМИ) и командами управления (КУ);
- расчет по командам МОЦ амплитудно-фазового распределения (АФР) в раскрыве АФАР, формирующего заданный приемный луч АФАР;
- выдача на фазовращатели и аттенюаторы, установленные в каждом из 25 каналов приема, команд для реализации заданного АФР;
- выдача в МЦО телеметрической информации о состоянии каналов приема и фактически реализованном АФР в раскрыве АФАР;
- передача в МЦО сигналов с TDMA, поступивших от КА.

В передающем тракте групповой видео-сигнал с MF-TDMA, сформированный МЦО, поступает на ДОС ПРД, где преобразуется в радиосигнал на несущей частоте передачи АФАР, усиливается до заданного уровня и синфазно распределяется на все 25 канальных передатчиков ПРД (1÷25).

В ДОС ПРД во взаимодействии с МОЦ осуществляется также:

- обмен с МОЦ по МКО информацией ТМИ и командами КУ;
- расчет по командам МОЦ АФР в раскрыве АФАР, обеспечивающего наведение передающего луча на КА;
- выдача на фазовращатели и аттенюаторы, установленные в каждом из канальных передатчиков ПРД (1÷25) команд для реализации заданного АФР;
- выдача в МОЦ ТМИ о состоянии каналов передачи и фактически реализованном АФР в раскрыве АФАР;

Энергетический потенциал модернизированной ЗС при мощности канальных передатчиков ПРД (1÷25) порядка 0,25 Вт и температуре шума ($T_{ш}$) канальных приемников ПРМ (1÷25) порядка 60° С составит:

- ЭИИМ ($P_{пер} \times G_{пер}$) - 33 дБ Вт;
- Добротность ($G_{пр} / T_{ш}$)-- 6 дБ.

5. Энергетические запасы в радиолиниях Борт-Земля и Земля-Борт

По входу приемно-передающей АФАР КА на линии Земля-Борт в каждом из 8-ми парциальных лучей реализуется принятый в стандарте DVB-RCS метод многостанционного доступа MF-TDMA. Доступ абонентских ЗС к КА на каждой из 8-ми несущих парциального луча в режиме TDMA обеспечивается со скоростью 512 кбит/сек. Для сигналов ЗС на линии Земля-Борт принимаем:

- кодирование/декодирование по «Витерби», FEC = 3/4;
- кодирование/декодирование Риды Соломона, PC = 47/51;

- метод модуляции/демодуляции - QPSC.

Энергетический запас в радиолинии Земля-Борт составляет порядка 6 дБ.

По входу приемно-передающей АФАР ЗС на линии Борт-Земля в передающем луче АФАР КА реализуется принятый в стандарте DVB-RCS метод многостанционного доступа TDMA. со скоростью 36,864 Мбит/сек. Для группового сигнала КА на линии Борт-Земля принимаем:

- кодирование/декодирование по «Витерби», FEC = 3/4;
- кодирование/декодирование Рида Соломона, PC = 47/51;
- метод модуляции/демодуляции - QPSC.

Энергетический запас в радиолинии Земля-Борт составляет порядка 6 дБ.

6. Заключение

Предложенный в настоящей работе вариант модернизации КА путем установки на борту КА приемно-передающей МЛА и МБЦП, реализующих стандарт DVB-RCS с пространственно-частотно-временным разделением ресурса, позволяет обеспечить создание мобильных сетей спутниковой связи стандарт DVB-RCS через КА на ГСО.

К сожалению, пока остаются за кадром вопросы практической реализации полученных результатов для отечественных КА, хотя вопросы создания перспективных КА с МБЦП стандарта DVB-RCS уже не однократно обсуждались и нашли практическую реализацию в ряде зарубежных проектов.

Для практической реализации указанных выше предложений наибольшую сложность представляет создание быстродействующих цифровых коммутаторов,

являющихся ключевым элементом МБЦП и многолучевых МЛА для КА на ГСО, реализующих зональное обслуживание.

Представленные результаты получены в рамках выполнения гранта РФФИ

16-07-00511-а

Библиографический список

1. Макаров Е.А. Аппаратная платформа цифровой антенной решетки для работы в диапазонах 2,4 – 2,5 и 4,9 – 5,9 ГГц. // Антенны. 2012. №3. С. 37-45.
2. Генов А.А. Оценка эффективности использования пространственно-частотно-временного ресурса КА с МЛА и БЦП в сетях связи стандарта DVB-RCS // Программные продукты и системы. 2009. №4. С. 21-24.
3. Зинин Е. Д., Мельников Г.А., Милосердов А. С. Перспектива использования фазированных антенных решеток в бортовых антеннах глобальной спутниковой сотовой связи // Труды МАИ, 2014. №73, URL: www.mai.ru/science/trudy/published.php?ID=48566
4. Шаханов А.Е., Рученков В. А., Круть А.В. Коммутируемые антенные системы X-диапазона для применения на борту космического аппарата // Труды МАИ, 2013. № 68, URL: www.mai.ru/science/trudy/published.php?ID=41971
5. Генов А.А. Бортовые цифровые платформы – технологический прорыв в повышении эффективности спутников связи и вещания // «Broadcasting». 2002. №3. С. 47-54.