

УДК 629.7.052

Использование режима межспутниковой ретрансляции в гидрометеорологической космической системе нового поколения на основе КА «Метеор-МП»

Ю. Б. Дорофеев, к. т. н., *dorov56@yandex.ru*

АО «Российские космические системы», Москва, Российская Федерация

С. В. Матвеев, к. т. н., *Matveev_SV@risde.ru*

АО «Российские космические системы», Москва, Российская Федерация

Л. Н. Рубан, *Ruban_LN@risde.ru*

АО «Российские космические системы», Москва, Российская Федерация

Д. А. Тулисов, *Tulisov_DA@risde.ru*

АО «Российские космические системы», Москва, Российская Федерация

Аннотация. Рассмотрены возможность и целесообразность использования режима межспутниковой ретрансляции информации от платформ сбора данных в приполярных районах РФ, принимаемой низкоорбитальной гидрометеорологической системой нового поколения на основе КА «Метеор-МП», путем ее передачи на бортовые радиотехнические комплексы геостационарных КА «Электро» с последующей оперативной доставкой на наземные станции Росгидромета.

Представлены оценка и результаты расчета основных параметров зон взаимной радиовидимости КА «Метеор-МП» и КА «Электро», определяющих возможность организации и основные характеристики режима межспутниковой ретрансляции. Определены основные принципы модернизации бортовых радиотехнических комплексов системы сбора и передачи данных, предназначенных для размещения на гидрометеорологических КА нового поколения «Метеор-МП» и обеспечивающих реализацию режима ретрансляции информации от наземных ПСД в приполярных регионах РФ на бортовые радиотехнические комплексы геостационарных КА «Электро».

Ключевые слова: бортовой радиотехнический комплекс, платформа сбора данных, ретрансляция информации, гидрометеорологические данные, зона видимости, станция приема и обработки информации

The Use of Inter-Satellite Retransmission in the New-Generation Hydrometeorological Space System Based on the «Meteor-MP» Spacecraft

Yu. B. Dorofeev, *Cand. Sci. (Engineering), dorov56@yandex.ru*

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

S. V. Matveev, *Cand. Sci. (Engineering), Matveev_SV@risde.ru*

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

L. N. Ruban, *Ruban_LN@risde.ru*

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

D. A. Tulisov, *Tulisov_DA@risde.ru*

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

Abstract. This article considers the possibility and practicability of application of the inter-satellite data retransmission from data collection platforms in the circumpolar region of Russia to the low-orbit hydrometeorological system based on the new generation spacecraft «Meteor-MP», by the means of transmitting it to the on-board radio complexes of the geostationary «Electro» spacecraft with its subsequent delivery to ground stations.

Provided is an assessment and the calculation results of the basic parameters of mutual visibility zones of «Meteor-MP» and «Electro» spacecraft, determining the possibility of setting up and the basic characteristics of the inter-satellite retransmission mode. Defined are the basic principles of modernization of the onboard radio complexes and data collection and transfer systems, intended for installation on the new generation hydrometeorological spacecraft «Meteor-MP» and ensuring the data retransmission from ground-based data collection platforms in the circumpolar regions of Russia to the on-board radio complexes of the «Electro» geostationary spacecraft.

Keywords: on-board radio complex, data collection platform, data retransmission, hydrometeorological data, zone of visibility, data receiving and processing station

Введение

Осуществляемые в настоящее время развертывание и эксплуатация геостационарных (ГС) космических аппаратов (КА) «Электро» предоставляют возможность оперативной доставки важных гидрометеорологических данных с платформ сбора данных (ПСД).

Однако зоны видимости КА ГС не покрывают приполярные районы Земли, так как при наблюдении поверхности Земли из точки стояния КА «Электро-Л» существует возможность сбора информации от ПСД, находящихся в районах широт менее 70° .

Прием информации от платформ сбора метеоданных, расположенных в районе Крайнего Севера (на широтах выше 70°) и недосягаемых для приемных средств КА «Электро-Л», выполняет гидрометеорологическая космическая система на основе КА «Метеор-М», которая не обеспечивает оперативной передачи информации на текущем витке на наземные станции приема и обработки информации (СПОИ).

В этой связи перед гидрометеорологической системой нового поколения «Метеор-МП» возникает задача сбора гидрометеорологической информации группировкой метеорологических низкоорбитальных ИСЗ «Метеор-МП» из районов Крайнего Севера с последующей ретрансляцией ее через геостационарные ИСЗ на наземные станции приема и обработки информации, что обеспечит задержку ее доставки не более 30 мин. Возможность организации подобного рода ретрансляции информации обусловлена ориентацией зон взаимной радиовидимости КА «Метеор-МП» и КА «Электро-Л» и определяет необходимость доработки бортового радиотехнического комплекса (БРК) системы сбора и передачи данных (ССПД) для обеспечения новых функциональных возможностей.

Оценка зон взаимной видимости космических аппаратов

Для оценки углов зон видимости (рис. 2) метеорологического космического аппарата типа «Метеор-МП», находящегося на приполярной орбите, с позиции нахождения космического аппарата типа

«Электро-Л», находящегося на геостационарной орбите, рассмотрим схематическое расположение космических аппаратов, представленное на рис. 1.

На рисунке даны следующие обозначения:

- A — позиция расположения КА «Электро-Л» на геостационарной орбите, высота орбиты 35 786 км от поверхности Земли в плоскости экватора;
- B — положение центра Земли;
- C и D — схематическое расположение на орбите НО КА «Метеор-МП» над полярной областью поверхности Земли соответственно в ближайшей и наиболее удаленной точках при нахождении КА ГС в плоскости орбиты КА НО. Средняя высота орбиты КА НО типа «Метеор-МП» — 832 км;
- C_2 и D_2 — положение плоскости, перпендикулярной проекции осей КА НО к поверхности Земли соответственно в точках C и D .

Оценка минимального времени взаимной видимости КА «Метеор-МП» и КА «Электро-Л»

Минимальное время взаимной видимости КА можно оценить по величине максимального затенения Землей траектории КА «Метеор-МП».

Половина угла затенения траектории соответствует углу $\angle DAD_1$ при нахождении точки стояния КА «Электро-Л» в плоскости орбиты КА «Метеор-МП». Угол $\angle DAD_1$ равен углу $\angle BAB_2$, который может быть вычислен как

$$\angle DAD_1 = \angle BAB_2 = \arcsin(BB_2/AB).$$

Отрезок BB_2 — радиус (средний) Земли, равный 6371 км.

Отрезок AB — радиус геостационарной орбиты, равный сумме радиуса Земли на экваторе (6378 км) и высоты собственно геостационарной орбиты (35 786 км), следовательно,

$$AB = 6378 \text{ км} + 35\,786 \text{ км} = 42\,164 \text{ км},$$

$$\begin{aligned} \angle DAD_1 = \angle BAB_2 &= \arcsin(BB_2/AB) = \\ &= \arcsin(6371/42\,164) = 8,69^\circ. \end{aligned}$$

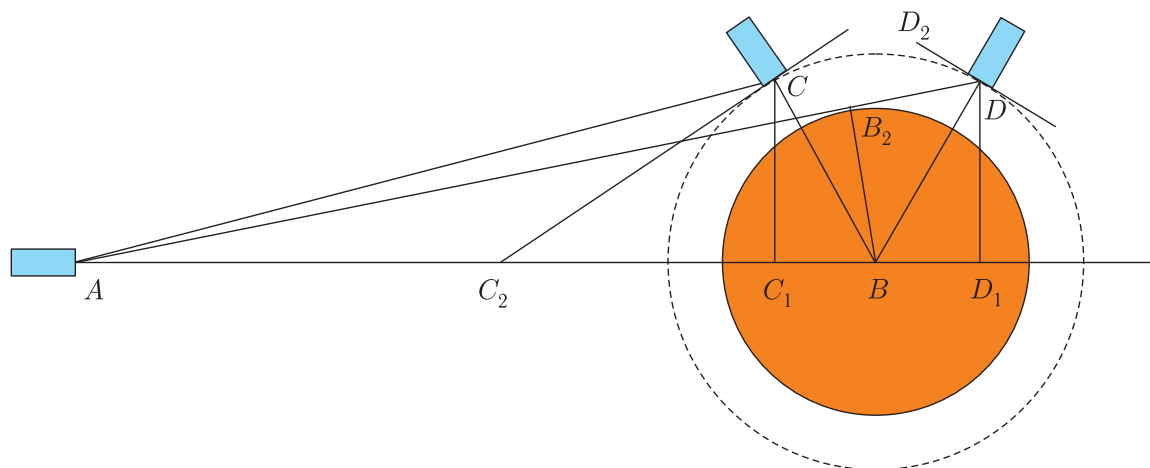


Рис. 1. Схематическое расположение КА для расчета углов видимости

Далее можно определить угол $\angle DBD_1$, соответствующий широте точки D границы видимости траектории КА «Метеор-МП».

$$\begin{aligned}\angle DBD_1 &= 90^\circ - \angle BDD_1, \\ \angle BDD_1 &= 90^\circ - \angle DAD_1 - \angle BDB_2, \\ \angle BDB_2 &= \arcsin(BB_2/BD).\end{aligned}$$

Следовательно, итоговая формула для расчета широты точки D , соответствующей значению угла $\angle DBD_1$, имеет вид:

$$\begin{aligned}\angle DBD_1 &= 90^\circ - \\ &\quad - (90^\circ - \angle DAD_1 - \arcsin(BB_2/BD)) = \\ &= \angle DAD_1 + \arcsin(BB_2/BD), \\ \angle DBD_1 &= 8,69^\circ + \arcsin(6371/(6371 + 832)) = \\ &= 8,69^\circ + 62,189^\circ = 70,88^\circ.\end{aligned}$$

Таким образом, КА «Метеор-МП», находящийся над полярными широтами более 70° северного и южного полушария, всегда попадает в зону видимости КА «Электро-Л».

Исходя из величины значения периода обращения КА «Метеор-МП», равного $T_{МП} = 101,3$ мин, можно определить значение минимального времени взаимной видимости:

$$\begin{aligned}t_{\text{вид}} &= T_{МП} \times (2 \times (180^\circ - 70^\circ)/360^\circ) = \\ &= 101,3 \times 0,61 = 61,9 \text{ мин.}\end{aligned}$$

Оценка времени пролета над полярной областью

Для оценки времени пролета КА «Метеор-МП» над северной полярной областью ограничимся значениями широт выше 70° , что определяется следующими двумя причинами:

- сбор данных с наземных метеорологических платформ, расположенных на широтах ниже (менее) 70° , может быть осуществлен с помощью КА, расположенного на геостационарной орбите, т.е. непосредственно с КА «Электро-Л»;
- на основании расчетов, приведенных выше, следует, что низкоорбитальный КА «Метеор-МП», находящийся на приполярной орбите, при прохождении широт более 70° находится в непосредственной видимости геостационарного КА «Электро-Л».

Оценка времени $t_{\text{пр}}$ пролета КА «Метеор-МП» над полярной областью с широтами более 70° может быть выполнена путем расчета длительности полета по дуге $\sim CD$ (см. рис. 1) траектории полета КА.

$$\sim CD = 180^\circ - 2 \times 70^\circ = 40^\circ,$$

$$\begin{aligned}T_{\text{пол}} &= T_{МП} \times (\sim CD/360^\circ) = \\ &= 101,3 \times (40^\circ/360^\circ) = 11,3 \text{ мин.}\end{aligned}$$

Оценка значений углов взаимной видимости КА над полярной областью

Минимальное и максимальное значения углов наблюдения КА «Метеор-МП» из точки стояния геостационарного КА «Электро-Л» на границах полярной области, ограниченной широтами свыше 70° , определяются соответственно углами $\angle DAD_1$ и $\angle CAC_1$.

Угол $\angle CAC_1$ определяется следующим образом:

$$\begin{aligned}\angle CAC_1 &= \arctg(CC_1/AC_1), \\ CC_1 &= BC \times \sin(\angle CBC_1),\end{aligned}$$

где отрезок BC — радиус орбиты КА «Метеор-МП», который равен: высота орбиты 832 км + средний радиус Земли 6371 км = 7203 км; угол $\angle CBC_1$ — значение широты границы полярной области, т. е.

$$\begin{aligned}\angle CBC_1 &= 70^\circ, \\ AC_1 &= AB - BC_1,\end{aligned}$$

где AB — это радиус орбиты геостационарного КА «Электро-Л», т. е. $AB = 42\,164$ км,

$$BC_1 = BC \times \cos(\angle CBC_1).$$

Таким образом, итоговая формула для расчетов угла $\angle CAC_1$:

$$\begin{aligned}\angle CAC_1 &= \arctg(CC_1/AC_1) = \\ &= \arctg\left(\frac{BC \times \sin(\angle CBC_1)}{AB - BC_1}\right) = \\ &= \arctg\left(\frac{BC \times \sin(\angle CBC_1)}{AB - BC \times \cos(\angle CBC_1)}\right).\end{aligned}$$

При использовании конкретных численных значений величин получается:

$$\begin{aligned}\angle CAC_1 &= \arctg\left(\frac{7203 \times \sin 70^\circ}{42\,164 - 7203 \times \cos 70^\circ}\right) = \\ &= \arctg\left(\frac{7203 \times 0,9397}{42\,164 - 7203 \times 0,342}\right) = \\ &= \arctg(6768,66/(42\,164 - 2463,43)) = \\ &= \arctg(6768,66/39\,700,57) = \\ &= \arctg(0,17049) = 9,67^\circ.\end{aligned}$$

Минимальный угол $\angle DAD_1$ определяется по аналогичной формуле с небольшими изменениями:

$$\begin{aligned}\angle DAD_1 &= \arctg(DD_1/AD_1) = \\ &= \arctg\left(\frac{BD \times \sin(\angle DBD_1)}{AB + BD_1}\right) = \\ &= \arctg\left(\frac{BD \times \sin(\angle DBD_1)}{AB + BD \times \cos(\angle DBD_1)}\right).\end{aligned}$$

Подставляя конкретные значения, получаем:

$$\begin{aligned}\angle DAD_1 &= \arctg\left(\frac{7203 \times \sin 70^\circ}{42\,164 + 7203 \times \cos 70^\circ}\right) = \\ &= \arctg\left(\frac{7203 \times 0,9397}{42\,164 + 7203 \times 0,342}\right) = \\ &= \arctg(6768,66/(42\,164 + 2463,43)) = \\ &= \arctg(6768,66/44\,627,43) = \\ &= \arctg(0,15166) = 8,62^\circ.\end{aligned}$$

Максимальное значение угла видимости КА «Метеор-МП» из точки стояния КА «Электро-Л» будет в момент пролета КА над полюсом (примерно). Данное значение определяется как \arctg отношения радиуса орбиты КА «Метеор-МП» и радиуса орбиты КА «Электро-Л»:

$$\text{Макс. угол.} = \arctg(7203/42\,164) = 9,69^\circ.$$

Таким образом, угол видимости КА «Метеор-МП» при пролете практически всех полярных областей из точки стояния КА «Электро-Л» находится в диапазоне от $8,6^\circ$ до $9,7^\circ$.

Оценка относительной ориентации космических аппаратов

Рассмотрим взаимное расположение осей космических аппаратов при движении КА «Метеор-МП» по траектории в зоне взаимной видимости. За ноль отсчета примем совпадение направлений осей космических аппаратов при нахождении точки стояния КА «Электро-Л» в плоскости орбиты КА «Метеор-МП» и при максимальном сближении КА. Обозначим угол как Ω КА.

Исходя из схемы, представленной на рис. 1, взаимное расположение осей КА при пролете

над полярной областью будет изменяться от значения угла $\angle ABC$ до значения угла $\angle ABD$. Таким образом,

$\Omega \text{КА}_{\text{пол.}} = \text{от до } 70^\circ \text{ до } 110^\circ \text{ (в течение 11 мин).}$

Значение углов $\Omega \text{КА}$ при пролете в пределах всей зоны взаимной видимости КА будет изменяться от значения, равного углу $\angle ABD$, до нуля и соответственно от нуля до значения минус $\angle ABD$ в южном полушарии:

$\Omega \text{КА} = \text{от } +110^\circ \text{ до } -110^\circ \text{ (в течение 60 мин).}$

При наблюдении поверхности Земли из точки стояния КА «Электро-Л» возможность сбора информации от ПСД имеется только для широт менее 70° .

Таким образом, проведенные оценки показывают, что для повышения оперативности сбора информации от ПСД в приполярных регионах может быть использован режим ретрансляции сигнала через КА «Метеор-МП».

Зоны видимости космических аппаратов КА «Электро-Л» и КА «Метеор-МП» представлены на рис. 2.

Зона видимости КА «Метеор-МП» составляет не менее 4000 км в диаметре, что практически полностью перекрывает полярные шапки Земли и позволяет ретранслировать сигналы от ПСД, недоступных для КА «Электро-Л» (в перспективе «Электро-М»).

При использовании режима ретрансляции сигналов от ПСД в приполярных районах оперативность приема информации наземными станциями может изменяться от нескольких минут до полутора (максимум) при наличии двух КА в группировке, так как ретрансляция сигналов возможна на любом витке пролета КА «Метеор-МП» над полярными областями (наклонение орбиты КА «Метеор-МП» составляет 98°).

Модернизация БРК ССПД

Решение такой задачи, как ретрансляция между КА НО и КА ГС, определяет необходимость создания нового поколения бортовых радиокomплексов БРК ССПД, позволяющих наряду с существующим каналом сбора информации от ПСД

(Земля) – НО ИСЗ – СПОИ (Земля) обеспечить с помощью дополнительного канала межспутниковой радиолнии оперативную передачу информации с ПСД в приполярных регионах по линии ПСД (Земля) – НО ИСЗ – ГС ИСЗ – СПОИ (Земля).

При этом аппаратное построение модернизированного БРК ССПД-МП должно обеспечить выполнение следующих функций:

- прием, обработку, хранение и передачу в транспортный информационный кадр, формируемый в бортовой информационной системе (БИС-МП КА «Метеор-МП»), данных от наземных платформ сбора данных для дальнейшей передачи их в главные метеорологические центры;
- ретрансляцию данных от наземных платформ сбора данных, расположенных в полярных зонах Земли, через геостационарные КА типа «Электро-Л» на наземные СПОИ.

Реализация функции ретрансляции сигнала от наземной ПСД на ГС КА возможна двумя путями:

- прямой ретрансляцией сигнала через КА «Метеор-МП» с переносом частоты с 402 МГц на 465 МГц;
- передачей сигнала от наземной ПСД с промежуточной регенерацией его на НО КА.

Результаты предварительной проработки и анализа возможности для реализации функции ретрансляции за счет вводимого в состав БРК ССПД канала межспутниковой радиолнии позволили определить целесообразность дооснащения существующей аппаратуры дополнительно буферным ЗУ небольшого объема 0,3 Мбит и передатчиком 465 МГц мощностью не менее 5 Вт, а также использования избыточного кодирования информации для повышения достоверности. При этом информацию от БРК ССПД на ГС ИСЗ можно передавать со скоростью от 1,2 кбит/с до 2,4 кбит/с. Мощность передатчика на канал и скорость передачи информации выбираются в зависимости от реальной помеховой обстановки.

Таким образом, потребуется доработка БРК ССПД в части изменения как его состава, так и аппаратуры, в него входящей, для реализации новых

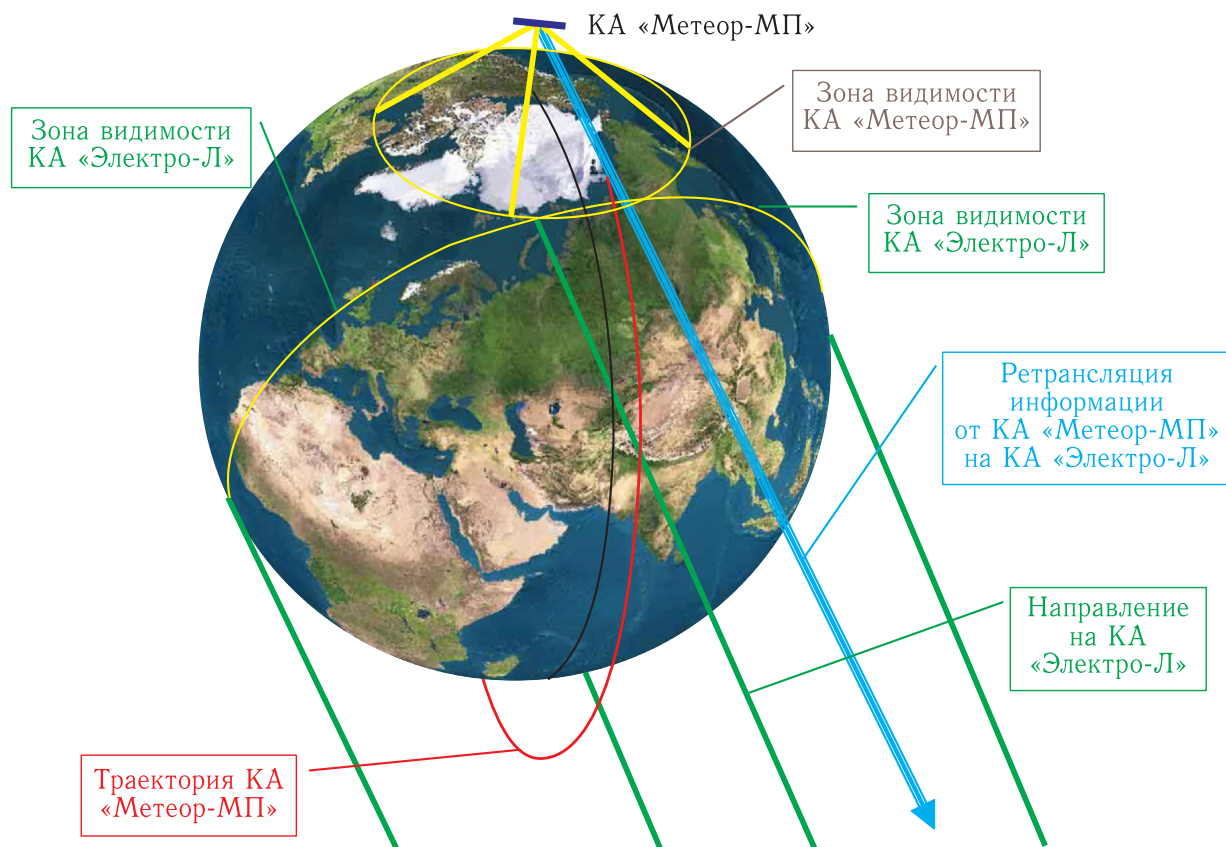


Рис. 2. Зоны видимости КА «Электро-Л» и КА «Метеор-МП»

функциональных возможностей и увеличения срока активного существования (САС), а именно:

- включение в состав БРК ССПД-МП приборов, обеспечивающих кодирование, формирование и передачу сигнала на частоте 465 МГц для последующей ретрансляции;
- введение сверточного кодирования информации и модуляции информации на борту для помехоустойчивой ретрансляции информации;
- установка передающей АФС 465 МГц, обеспечивающей передачу информации от КА «Метеор-МП» на ГС ИСЗ;
- доработка УЗФК в части введения в него дополнительного буферного ЗУ для хранения, формирования и последующей передачи информации, полученной от ПСД из приполярных районов России.

Модернизированный подобным образом вариант БРК ССПД при размещении на гидрометеорологических КА нового поколения «Метеор-МП» обеспечит реализацию режима ретрансляции информации от наземных ПСД на бортовой комплекс КА «Электро».

рологических КА нового поколения «Метеор-МП» обеспечит реализацию режима ретрансляции информации от наземных ПСД на бортовой комплекс КА «Электро».

Заключение

Ориентация зон взаимной радиовидимости КА ГС «Электро-Л» и КА НО «Метеор-МП» позволяет использовать режим межспутниковой ретрансляции для повышения оперативности доставки информации от платформ сбора данных в низкоорбитальной гидрометеорологической системе нового поколения.

В соответствии с Федеральной космической программой РФ запуск первого КА «Метеор-МП» (№ 1) запланирован на 2024 г. В этой связи, поскольку результаты предварительной проработки показали возможность и основные принципы создания бортового комплекса, обеспечивающего

выполнение функций ретрансляции с заданными параметрами, целесообразно осуществить проектирование БРК ССПД-МП с применением методов, которые были разработаны в АО «Российские космические системы» для КА «Метеор-М» с применением технических решений, используемых для диапазона частот (0,4–0,5 ГГц). При разработке канала ретрансляции сигналов от платформ сбора данных целесообразно применить опыт создания бортового радиокомплекса систем КОСПАС/Курс.

Реализация предлагаемым способом канала ретрансляции в БРК ССПД для КА «Метеор-МП» позволит охватить недоступные для ретранслятора ГС КА районы, при этом задержка передачи потребителю гидрометеорологической информации составит не более 30 мин.

Список литературы

1. Селиванов А.С., Рогальский В.И., Дедов Н.В. Космическая система сбора природноресурсных данных с наземных платформ и определения их местоположения «Курс» // Современные технологии автоматизации, 1997, № 3. «СТА-ПРЕСС». С. 36–41.

2. Рогальский В.И. Аналитический обзор «Российские космические системы местоопределения подвижных средств и передачи цифровых данных». М.: РНИИ КП, 2000.

3. Горностаев Ю.М. Перспективные спутниковые системы связи. М., 2000. 129 с.

References

1. Selivanov A.S., Rogal'skiy V.I., Dedov N.V. Kosmicheskaya sistema sbora prirodnorekursnykh dannykh s nazemnykh platform i opredeleniya ikh mestonakhzhdeniya "Kurs" [The Course spaceborne system of collection of data on natural resources from ground-based platforms and determination of their location]. *Sovremennye tekhnologii avtomatizatsii* [Modern automatization technologies]. STA-PRESS, No. 3, 1997, pp. 36–41.
2. Rogal'skiy V.I. *Rossiyskie kosmicheskiye sistemy mestoopredeleniya podvizhnykh sredstv i peredachi tsifrovyykh dannykh* [Russian space systems of location of the mobile facilities and digital data transmission], analytical review. Moscow, RNII KP, 2000.
3. Gornostayev Yu.M. *Perspektivnye sputnikovye sistemy svyazi* [Advanced satellite communication systems]. Moscow, 2000, 129 p.