

УДК 621.396.946

КОМБИНИРОВАННАЯ СПУТНИКОВАЯ СИСТЕМА СВЯЗИ С ЗЕМНЫМИ И КОСМИЧЕСКИМИ АБОНЕНТАМИ НА БАЗЕ ГЕОСИНХРОННЫХ СПУТНИКОВ-РЕТРАНСЛЯТОРОВ, ОСНАЩЕННЫХ МНОГОЛУЧЕВЫМИ АНТЕННАМИ

¹Выгонский Ю.Г., ¹Мухин В.А., ¹Кузовников А.В., ²Сомов В.Г.

¹ОАО «Информационные спутниковые системы» им. ак. М.Ф. Решетнёва, Железногорск, e-mail: office@iss-reshetnev.ru;

²ФБГОУ ВПО «Сибирский государственный аэрокосмический университет им. ак. М.Ф. Решетнёва», Красноярск, e-mail: info@sibsau.ru

Для территории Российской Федерации обеспечить благоприятные условия для связи с наземными абонентами (большие углы возвышения) возможно при использовании спутников на высоких эллиптических орбитах. Однако длительность активного участка работы таких спутников составляет не более одной трети периода обращения по орбите, что приводит к неэкономичному использованию ресурсов спутников, особенно оснащенных крупногабаритной многолучевой антенной. В статье описывается вариант комбинированной системы связи с наземными и космическими абонентами, позволяющей расширить активный участок работы спутников на высокой эллиптической орбите и тем самым увеличить их загрузку. Спутники-ретрансляторы используют многолучевые антенны. В период нахождения спутника над зоной обслуживания земных абонентов центральная группа лучей используется для обслуживания земных абонентов, а периферийная группа – для обслуживания космических абонентов. Спутники-ретрансляторы, находящиеся вне зоны расположения земных абонентов, обслуживают только космических абонентов, используя для этого все лучи многолучевой антенны. В целом это позволяет увеличить период активной работы спутников-ретрансляторов, повышая пропускную способность системы и её экономическую эффективность.

Ключевые слова: высокоэллиптическая орбита, многолучевая антенна, космический абонент, спутниковая связь, наземный абонент

COMBINED SATELLITE COMMUNICATIONS SYSTEM SERVING GROUND AND SPACE USERS BASED ON GEOSYNCHRONOUS ORBIT DATA RELAY SATELLITES EQUIPPED WITH MULTIPLE BEAM ANTENNAS

¹Vygonский Y.G., ¹Mukhin V.A., ¹Kuzovnikov A.V., ¹Somov V.G.

¹The Joint-Stock Company «Information Satellite Systems – Reshetnev Company», e-mail: office@iss-reshetnev.ru;

²Federal State Budget Educational Institution of Higher Professional Education «Siberian State Aerospace University», Krasnoyarsk, e-mail: info@sibsau.ru

Providing facility for communication with ground users (high elevation angles) for Russian Federation territory is possible if used high-elliptical orbit satellites. However duration of active site operation such satellites less then one third orbital period, that result to non-efficient using of satellite resources, especially for satellites with large multibeam antenna. This paper proposes a variant developed by the authors of combined satellite communications system serving ground and space users based on high elliptical orbit data relay satellites, which extending an active area of work of satellites and satellite loading. Data relay satellites use multiple beam antennas. When the satellite located over ground users coverage area central beam group used for serving ground users, peripheral group – for serving space users. Data relay satellites, located out of service area for ground users, served only space users. That allow increase active work period of data relay satellites, rise system bandwidth and economical effectiveness.

Keywords: High Elliptical Orbit (HEO), multiple beam antenna, space user, satellite communication, ground user

Для территории Российской Федерации обеспечить благоприятные условия для связи с наземными абонентами (большие углы возвышения) возможно при использовании спутников на высоких эллиптических орбитах. Однако длительность активного участка работы таких спутников составляет не более одной трети периода обращения по орбите, что приводит к неэкономичному использованию ресурсов спутника, особенно оснащенных крупногабаритной многолучевой антенной. В статье описывается вариант комбинированной системы связи с наземными и космическими

абонентами, позволяющей расширить активный участок работы спутников на высокой эллиптической орбите и тем самым увеличить их загрузку.

В настоящее время подавляющее большинство спутников связи размещается на геостационарной орбите (ГСО). Вместе с тем применительно к территории России необходимо отметить, что связь с геостационарными спутниками на ней возможна при относительно низких углах возвышения (не более 30°), что приводит к большим потерям сигнала при их распространении через земную атмосферу и особенно через

районы возникновения атмосферных осадков. Последнее обстоятельство ограничивает возможность использования для связи с земными станциями субмиллиметровых и миллиметровых волн (от 20 ГГц и выше).

Кроме того, при низких углах возвышения возрастает вероятность блокирования сигнала природными возвышенностями, строениями, возрастает поглощение сигнала листвой деревьев и др. Наконец, в поле зрения геостационарных спутников не попадают арктические районы, что также имеет для России немаловажное значение.

Известным способом устранения перечисленных недостатков спутников связи на ГСО является использование спутников на наклонных высоких эллиптических орбитах (ВЭО), например типа «Молния», первенство в освоении которых принадлежит нашей стране. Спутник на такой орбите с апогеем в Северном полушарии способен охватить всю территорию России, обеспечивая связь с любыми пунктами страны посредством одной-единственной ретрансляции через спутник. При использовании геостационарных спутников это невозможно, поскольку для охвата всей территории России требуется как минимум два таких спутника.

При этом связь через спутник на ВЭО может осуществляться при углах возвышения не ниже 40° (вплоть до зенитных углов), что существенно снижает указанные выше проблемы при распространении радиосигнала.

То, что в отличие от геостационарного спутника спутник на любой другой орбите движется относительно земной станции, не имеет значения, например, в системах подвижной спутниковой связи. В этих системах, независимо от типа используемых орбит, земные станции имеют либо всенаправленную антенну, не требующую сле-

жения за спутником, либо направленную антенну, но в этом случае слежение должно производиться за любым спутником, так как перемещается в пространстве сама земная станция (на автомобиле, поезде, самолете и других движущихся объектах) [1].

Для обеспечения непрерывного круглосуточного покрытия заданного района Земли традиционные системы связи на ВЭО построены на базе не менее трех геосинхронных спутников-ретрансляторов (СР), обращающихся по орбитам, имеющим разнесенные на 120° долготы восходящих узлов [2]. Связь с земными абонентами осуществляется в период нахождения по меньшей мере одного СР над зоной их обслуживания. Перед выходом СР за пределы зоны обслуживания информационный поток от земных абонентов переключают на СР, входящий в зону обслуживания.

Как уже было отмечено выше, одним из возможных применений спутниковых систем связи на ВЭО является связь с подвижными абонентами. В этом случае необходимо учесть, что современные действующие системы подвижной связи строятся на базе дорогостоящих геостационарных СР, оснащенных крупногабаритными многолучевыми антеннами (МЛА) с эквивалентным диаметром апертуры порядка 12 м (как, например, спутники Thuraya, Garuda, Inmarsat-4, ETS-VIII) и даже 18 м (спутник TerreStar). МЛА последнего спутника способна формировать 500 точечных лучей.

Для обеспечения связи с маломощными земными абонентскими терминалами типа «телефонная трубка» указанные выше крупногабаритные МЛА СР формируют очень узкие лучи шириной порядка 1° . На рис. 1 показан пример покрытия территории РФ такими лучами.

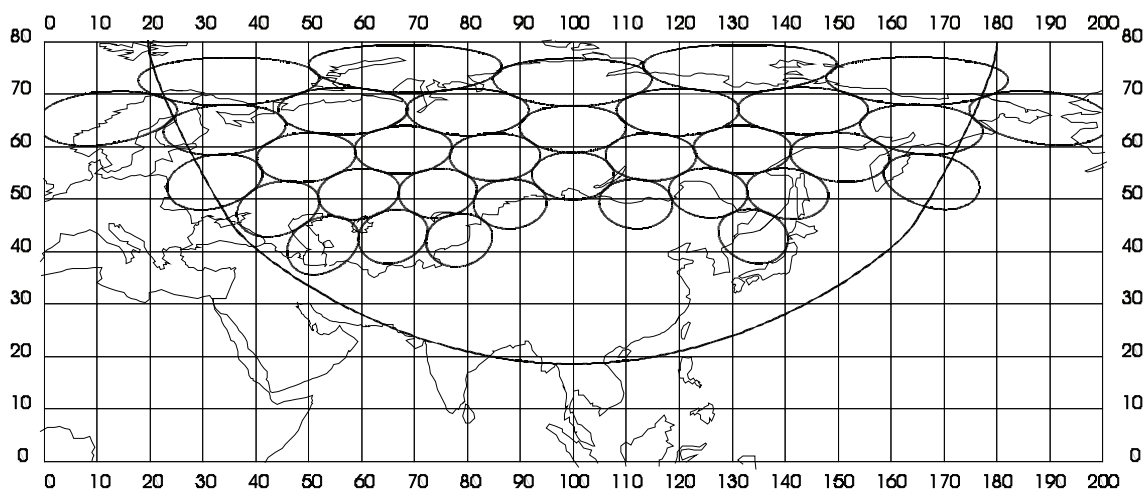


Рис. 1. Покрытие территории РФ лучами МЛА при нахождении СР в апогее суточной ВЭО

Для формирования приведенного на рис. 1 многолучевого покрытия на спутниках обычно используют так называемые гибридные зеркальные антенны, содержащие рефлектор параболической формы и облучающую решетку. В простейшем случае каждый луч формируется с помощью отдельного излучателя такой решетки, и решетка в целом приобретает форму, близкую к прямоугольной.

При своем движении по ВЭО спутник будет следовать по трассе, проекция которой на земную поверхность показана на рис. 2. Соответственно, антенна, установленная на

спутнике с трехосной системой ориентации, также будет изменять свою пространственную ориентацию, совершив вместе со спутником от момента начала сеанса связи до его конца поворот вокруг направленной на Землю оси более чем на 180° , и обслуживаемая территория окажется вне многолучевого покрытия, показанного на рис. 3. Для компенсации этого эффекта на спутнике потребуется сформировать большее число антенных лучей, чем это необходимо для покрытия территории России, и облучающая решетка примет форму, близкую к правильному шестиугольнику.

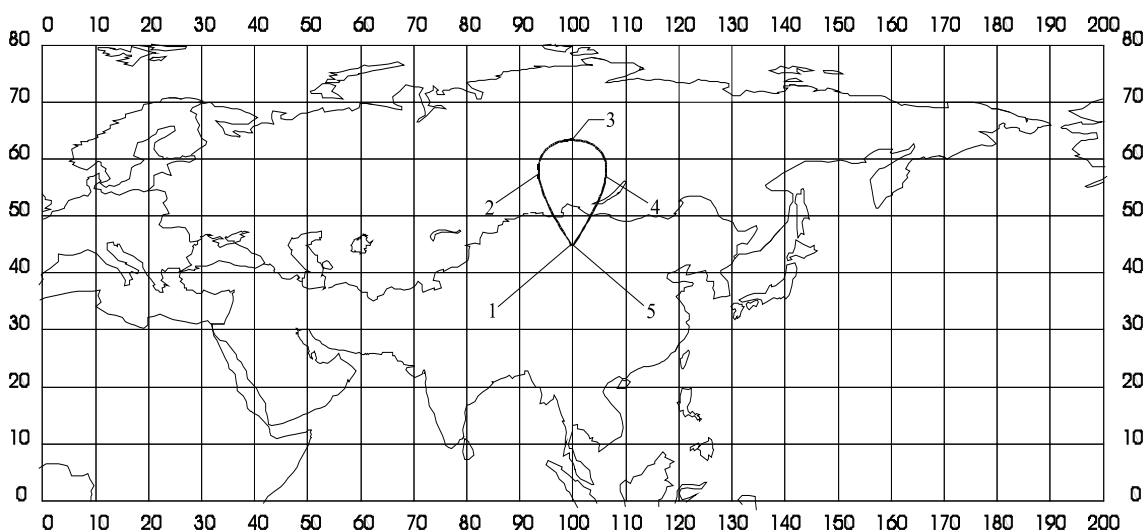


Рис. 2. Трасса движения СР на активном участке ВЭО:
 1 – начало сеанса связи; 2 – восходящая часть трассы; 3 – апогей орбиты;
 4 – нисходящая часть трассы; 5 – окончание сеанса связи

Для минимизации сектора обзора заданной территории, а значит, и количества лучей, требующихся для ее покрытия, с помощью МЛА СР на ВЭО электрическую ось антенны (точнее – ось ее центрального луча) необходимо постоянно наводить на определенную точку прицеливания, например на центр обслуживаемой территории [4].

В качестве примера на рис. 3 показано взаимное перемещение произвольной зоны обслуживания и многолучевого покрытия, образуемого 19-ю лучами МЛА в процессе движения СР по орбите от начала рабочего участка (левая часть рисунка) до некоторой точки, в которой СР поворачивается вокруг своей продольной оси на угол примерно 45° относительно положения в начале рабочего участка (правая часть рисунка). Размер области формирования многолучевого покрытия определяется угловым размером зоны обслуживания, наблюдаемым из точки нахождения СР в начале рабочего участка

ВЭО. Точка прицеливания центрального луча МЛА (на рис. 3 этот луч показан под номером 10) совпадает с центром зоны обслуживания. То есть угловой размер многолучевого покрытия выбирается таким, что при вращении МЛА вокруг оси центрального луча в процессе движения СР по рабочему участку ВЭО зона обслуживания не выйдет за пределы границы области формирования многолучевого покрытия.

Как видно из рис. 3, чтобы избежать постоянного включения всех лучей МЛА для компенсации вращения СР вокруг продольной оси следует в процессе движения СР по орбите контролировать взаимное положение зоны обслуживания и многолучевого покрытия и при необходимости осуществлять отключение одних лучей и включение других. Это позволяет сократить количество активных лучей, задействуемых для связи с земными абонентами (показаны на рис. 3 серыми кругами).

Из рис. 1 следует, что для обеспечения на территории РФ подвижной спутниковой связи необходимы два геостационарных СР, которые ввиду постоянного нахождения над данным регионом будут иметь круглосуточную загрузку. При организации подвижной связи с помощью СР на ВЭО для обеспечения круглосуточного обслуживания данной территории потребуются, как уже указывалось, не менее трех таких СР, из которых актив-

ным в каждый конкретный момент времени является только один. В конечном счете, несмотря на то, что системы подвижной связи на ВЭО привлекательны для высокоширотных территорий вследствие предоставляемой возможности связи при более высоких углах возвышения, чем в случае использования геостационарных систем, по экономической эффективности системы на ВЭО уступают системам на геостационарной орбите.

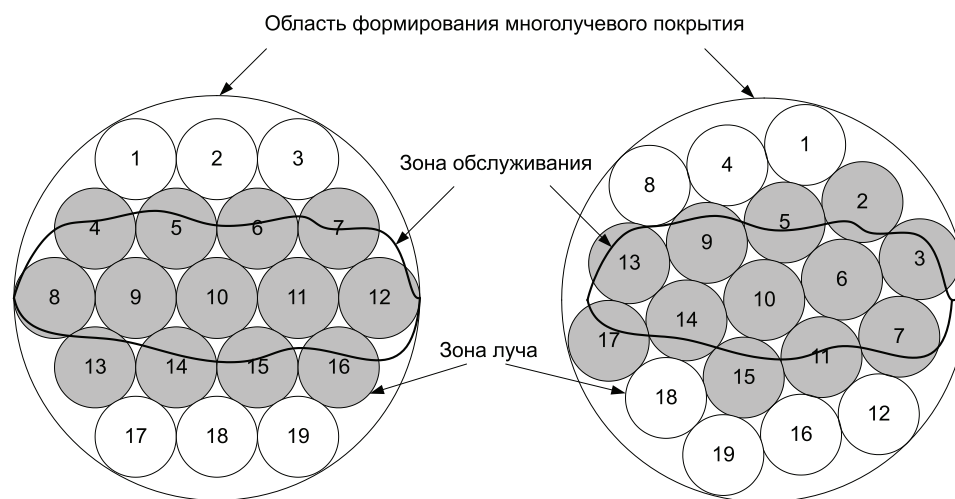


Рис. 3. Взаимное перемещение зоны обслуживания и многолучевого покрытия МЛС в процессе движения СР по ВЭО

Следовательно, для повышения экономической эффективности системы связи на ВЭО необходимо возложить на СР решение такой дополнительной целевой задачи, которая могла бы выполняться основной или дополнительной аппаратурой ретрансляции при нахождении СР вне упомянутого выше активного участка ВЭО. При этом с экономической точки зрения было бы желательно, чтобы дополнительная аппаратура ретрансляции использовала ту же крупногабаритную антенну, что и аппаратура для подвижной связи (т.е. работала бы в близком частотном диапазоне).

Поскольку для подвижной спутниковой связи в настоящее время используются в основном частоты L (1,6/1,5 ГГц) и S (2,2/2,0 ГГц) диапазонов [3], то в этом плане представляется целесообразным в качестве дополнительной аппаратуры использовать ретрансляционную аппаратуру для обслуживания космических абонентов, работающую на частотах S -диапазона.

Рассмотрим принципы построения комбинированной спутниковой системы связи с земными и космическими абонентами [5].

Общий вид комбинированной системы для связи с земными и космическими абонентами приведен на рис. 4. Система строится на базе геосинхронных спутников-ретрансляторов, обращающихся по ВЭО и имеющих разнесенные на 120° долготы восходящих узлов. Связь с земными абонентами осуществляется в период нахождения спутника-ретранслятора над зоной обслуживания земных абонентов, при этом указанный геосинхронный СР соединяется посредством фидерной радиолинии по меньшей мере с одной центральной станцией, расположенной в зоне обслуживания земных абонентов, в течение периода нахождения спутника-ретранслятора над указанной зоной.

В соответствии с рис. 4 спутник-ретранслятор СР 1 находится над зоной обслуживания земных абонентов, для связи с которыми его приемная и передающая многолучевые антенны формируют центральную группу лучей, и зоны этих лучей заполняют собой всю область нахождения земных абонентов. Область формирования центральной группы лучей ограничена

конической поверхностью, максимальный угловой размер которой определяется размерами области нахождения земных абонентов, видимой с СР 1 в момент его нахождения в начале или конце активного участка орбиты. Помимо земных абонентов, СР 1 осуществляет информационный обмен с находящимися в поле его зрения

космическими абонентами, обращающимися по низким околоземным орбитам. Для этой цели МЛА формируют периферийную группу лучей, охватывающих видимую с СР часть сферы возможных положений космических абонентов на их орбитах. (Для простоты на рис. 4 показан лишь один луч из указанной периферийной группы).

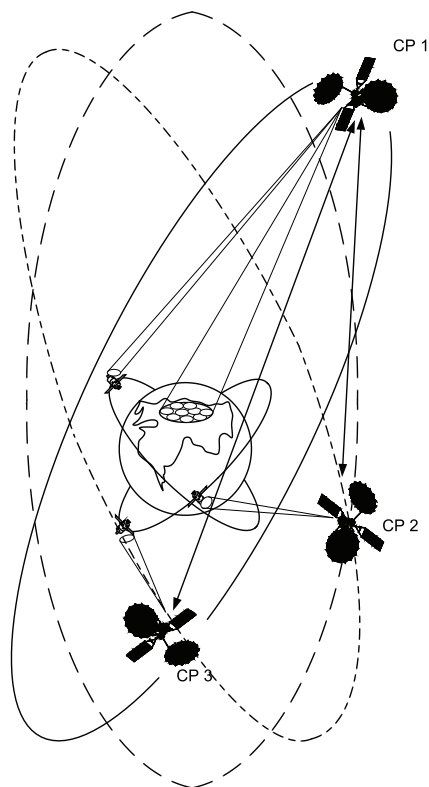


Рис. 4. Общий вид комбинированной спутниковой системы связи с земными и космическими абонентами

Спутники-ретрансляторы СР 2 и СР 3 находятся вне зоны обслуживания земных абонентов и все формируемые их антеннами лучи могут быть использованы для обслуживания космических абонентов (на рис. 6 показано лишь по одному лучу для СР 2 и 3, нацеленных на космические абоненты).

Для пояснения принципа разделения лучей на рис. 5 приведены проекции лучей МЛА применительно к СР 1, охватывающие видимую с СР часть сферы возможных положений космических абонентов (черный круг). Из этих лучей МЛА лучи с проекциями в виде серых кругов покрывают показанную на рис. 6 зону обслуживания земных абонентов и образуют центральную группу лучей. Лучи с проекциями в виде белых кругов образуют периферийную группу и предназначены для обслуживания космических абонентов.

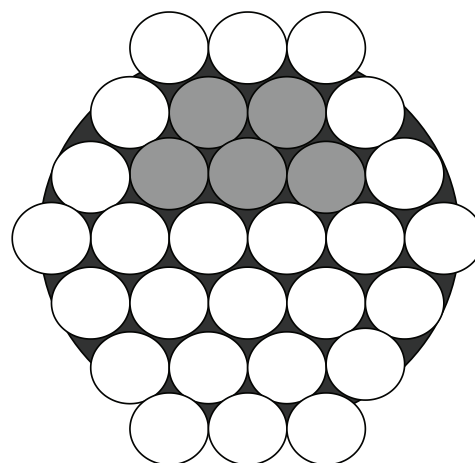


Рис. 5. Проекция центральных и периферийных лучей МЛА

При движении спутника по орбите центральная группа лучей не остается постоянной. По мере выхода обслуживаемой территории из поля зрения отдельных центральных лучей происходит их перевод в разряд периферийных, а те периферийные лучи, в поле зрения которых входит обслуживаемая территория, переводятся в разряд центральных (как было показано на рис. 3).

Логика функционирования системы основывается, как уже было изложено, на том, что СР, находящийся над зоной расположения земных абонентов, использует для их обслуживания центральную группу лучей МЛА, а для обслуживания космических абонентов – периферийную группу лучей. Принятая от абонентов информация ретранслируется непосредственно в пункты их приема.

СР, находящиеся вне зоны расположения земных абонентов, обслуживают только космических абонентов, для чего они могут задействовать любой из центральных или периферийных лучей. Принятая от них информация направляется сначала по межспутниковой линии связи на СР, находящийся над зоной обслуживания земных абонентов (и зоной размещения пунктов обмена информацией с космическими объектами), а затем на Землю.

Таким образом, в предложенной комбинированной системе обеспечивается загрузка спутников-ретрансляторов на пассивных

участках ВЭО, не видимых с территории России, Кроме того, избыточные с точки зрения связи с земными абонентами лучи МЛЖ могут использоваться для обслуживания космических абонентов на активных участках ВЭО.

В целом это позволяет увеличить период активной работы спутников-ретрансляторов, а значит, пропускную способность системы и ее экономическую эффективность.

Необходимо отметить, что в предлагаемой комбинированной системе для связи с космическими абонентами, как и с земными абонентами, будут использоваться МЛЖ диаметром порядка 12 м, что втрое превышает диаметр антенн, установленных на специализированных спутниках-ретрансляторах для информационного обмена с космическими абонентами типа «Луч-5» [6]. Это позволяет в 9 раз увеличить энергетический потенциал радиолиний связи с космическими абонентами, что имеет важное значение при обслуживании космических абонентов, на которых затруднена установка направленных антенн (например, ракеты-носители, разгонные блоки), а также при связи с объектами, потерявшими пространственную ориентацию.

Кроме того, многолучевое покрытие подспутниковой области, включающей сферу возможных положений космических абонентов на их орбитах, позволяет в любой момент получить от них сигнал запроса связи, установить и поддерживать с ними связь без использования на СР следящих устройств.

В [7] в качестве одного из приоритетных направлений космической деятельности предлагается разработка спутниковой системы управления подвижными объектами во всех земных средах. Если околоземное космическое пространство (в пределах высот до 2000 км) рассматривать как одну из земных сред и находящиеся в этом пространстве космические объекты «уравнять в правах» с сухопутными, морскими и воздушными подвижными объектами, то предлагаемая комбинированная система может рассматриваться в качестве одного из вариантов построения упомянутой системы управления подвижными объектами.

Список литературы

1. Спутники связи на высокоэллиптической орбите: новые возможности применения / Ашурков Е.А., Крестинин С.Ю., Мухин В.А., Радайкин В.П. // 2-я Международная конференция «Спутниковая связь». – М. 1996. – С. 121–124.

2. Патент США № 4943808.

3. Регламент радиосвязи. Статьи. Издание 2008 года // Международный союз электросвязи. – Т. 1. – 428 с.

4. Системы спутниковой связи с эллиптическими орбитами, разнесением ветвей и адаптивной обработкой / Камнев Е.Ф., Акимов А.А., Бобков В.Ю. и др. – М.: Глобсатком, 2009. – 724 с.

5. Патент 2366086 РФ, МПК H04B. Способ построения космической системы ретрансляции с использованием геосинхронных спутников-ретрансляторов / Мухин В.А. (РФ). – № 2008131091/09; заявлено 28.07.08; опубл. 27.08.09, Бюл. № 24.

6. Маринин И., Лисов И. «Луч-5А» – аппарат многофункциональной системы ретрансляции // Новости космонавтики. – 2003. – № 12 (251). – С. 50–51.

7. Чернявский Г.М. Космическая деятельность в России: проблемы и перспективы // Вестник РАН. – 2013. – т. 83, № 9. – С. 799–806.

References

1. Ashurkov E.A., Krestinin S.U., Mukhin V.A., Radaykin V.P. 2 *Mezhdunarodnaya Konferentsia «Sputnikovaya svyaz'»* («Sputniki svyazi na vysokoelipticheskoy orbite: novye vozmozhnosti primeneniya»). Moscow, 1996, pp. 121–124.

2. U.S. patent № 4943808.

3. ITU Publications: The Radio Regulations, Edition of 2012. Vol 1. 481 p.

4. Kamnev E.F., Akimov A.A., Bobkov V.U. *Sistemy spyt-nikovoy svyazi s ellepticheskimi orbitami, razneseniem vetvei i adaptivnoy obrabotkoy*. [Satellite communication systems with elliptical orbit satellite, branch division and adaptive processing]. Moscow, Globosatcom, 2009. 724 p.

5. RF patent № 2366086, МПК H04B.

6. Marinin I., Lisov I. «Luch-5A» – *Apparat mnogofunktsional'noy sistemy retranslyatsii* [Multifunctional retransmission system spacecraft – «Luch-5A»]. «Astronautics news», no. 12 (251), 2003, pp. 50–51.

7. Chernyavskiy G.M. *Kosmicheskaya deyatel'nost' v Ros-sii: problem i perspektivy* [Space activity in Russia: problems and perspectives]. Russian Academy of Sciences messenger, vol.83, no. 9, 2013, pp. 799–806.

Рецензенты:

Петров М.Н., д.т.н., профессор, заведующий кафедрой «Электронная техника и телекоммуникации», ФГБОУ ВПО «Сибирский государственный аэрокосмический университет имени академика М.Ф. Решетнёва», г. Красноярск;

Антамошкин А.Н., д.т.н., профессор кафедры «Системный анализ и исследование операций», ФГБОУ ВПО «Сибирский государственный аэрокосмический университет имени академика М.Ф. Решетнёва», г. Красноярск.

Работа поступила в редакцию 02.07.2014.