

Рис. 1. Трасса НЕО Odyssey

ющих ССС. Краткие характеристики основных типов орбит представлены в таблице.

Одним из решений, полученных как в России [1], так и в США [2], стал метод эмуляции свойств GEO путем использования высокоэллиптических орбит (НЕО).

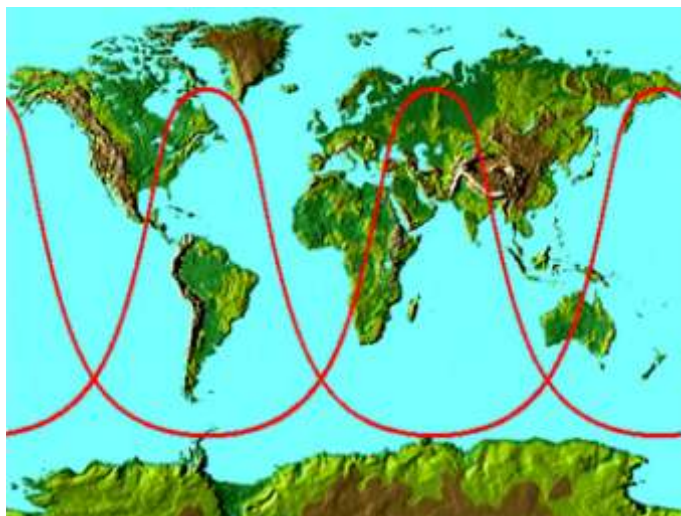


Рис. 2. Трасса НЕО Archimedes

В основе этого решения лежит известное свойство замедления углового движения спутника по отношению к наземному потребителю на апогейном участке НЕО. В том случае, если НЕО является геосинхронной и на ней развернута фазированная ОГ из нескольких спутников, а также обеспечивается синхронизация переключения бортового ретрансляционного оборудования на апогейном участке нисходящего спутника на входящий, то для наземного пользователя реализуется эффект относительной неподвижности спутника связи. Точнее, формируется ряд пространственных областей (другими словами, виртуальных позиций), в которых гаранти-

рованно находится не менее одного работающего спутника (с включенной бортовой ретрансляционной аппаратурой). В этом случае центральным вопросом становится выбор геосинхронной НЕО. Действительно, чем более стабильно относительное положение спутника на апогейном участке, тем меньшее количество спутников в ОГ необходимо для обеспечения требуемой точности пространственного положения виртуальной позиции.

Орбиты для эмуляции GEO

В наибольшей степени поставленной задаче соответствуют НЕО с периодом обращения 6, 8, 12 и 24 ч (см. таблицу). На рис. 1-3 представ-

лены примеры трасс движения спутников на этих орбитах. Однако развертывание ССС, обеспечивающих голосовую связь, на базе орбиты "Тундра" затруднено вследствие удаленности апогейного участка, а следовательно, значительных временных задержек

Эмуляция GEO с помощью НЕО Odyssey не позволяет разворачивать региональные ССС, а положение виртуальных позиций характеризуется значительными угловыми девиациями спутников, для снижения которых требуется значительное увеличение мощности ОГ.

Аналогичные проблемы существуют и при эмуляции GEO с использованием орбит "Молния" и Archimedes, однако, несмотря на это, орбита Archimedes в США выбрана базовой для эмуляции GEO и планируется к использованию в ССС VirtualGeo.

VGEO на основе орбиты Archimedes

Проект VirtualGeo предусматривает создание виртуальной геостационарной орбиты сегментом из пяти фазированных спутников, находящихся на орбите Archimedes с наклоном 63,4°. Один сегмент формирует три виртуальные позиции, расположенные на высотах от 17 500 до 27 300 км в поясах 46°-64° с.ш. и ю.ш. Время работы каждого спутника за один 8-часовой оборот не превышает 4,8 ч.

В рамках проекта VirtualGEO предполагается развернуть два сегмента для реализации VGEO в северном полушарии и один сегмент - в южном полушарии. Система VirtualGEO предназначена для предоставления услуг широкополосной связи и доступа в Интернет. Проектная стоимость системы из 15 спутников - 2,6 млрд дол.

PGEO на основе орбиты "Кентавр"

В России аналогичные исследования проводились в рамках совмест-

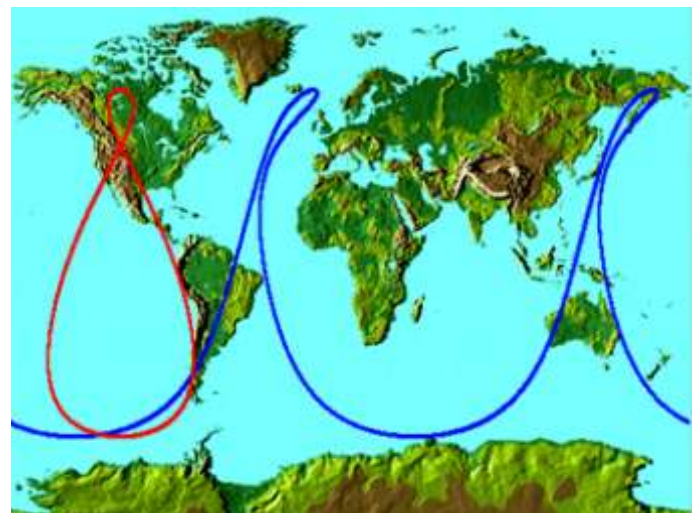


Рис. 3. Трассы НЕО "Молния" (синяя линия) и "Тундра" (красная линия)

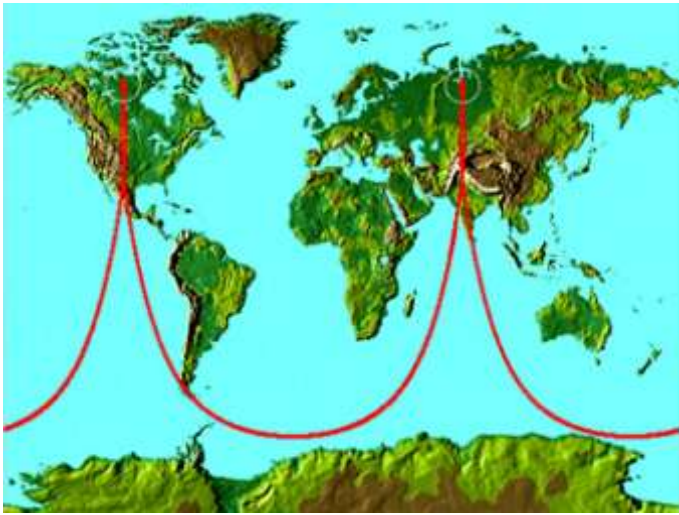


Рис. 4. Трасса спутника на орбите "Кентавр"

ных работ в НПО машиностроения, Информационном космическом центре (ИКЦ) "Северная Корона", ЛО-НИИР и 16 ЦНИИ МО РФ [3].

Основной целью исследований был поиск орбиты, которая позволила бы эмулировать GEO с максимальной степенью приближения. Критерием являлось снижение суммарных затрат на развертывание космического и земного сегментов перспективной региональной ССС, предусматривающей возможность дальнейшего развития и наращивания до национальной, а в перспективе и глобальной системы.

В ходе исследований из класса 12-часовых геосинхронных НЕО была выделена орбита, отличающаяся высокой стабильностью положения подспутниковой точки на апогейном участке. Как видно на рис. 4 и 5, трасса орбиты на апогейных участках основного и сопряженного витка представлена характерной для GEO узкой вытянутой несимметричной "восьмеркой".

12-часовая НЕО, трасса которой на апогейном участке описывает характерную "восьмерку", получила рабочее название "Кентавр". GEO, эмулированная путем использования орбиты "Кентавр", получила название "псевдостационарной" (PGEO).

Как показали дальнейшие исследования, для получения PGEO наиболее целесообразно использовать 4 спутника по двум основным причинам:

- снижение мощности ОГ до 3 спутников приводит к резкому снижению точности эмуляции GEO, а увеличение числа спутников не дает заметного улучшения этого параметра;
- бортовая аппаратура связи в этом случае работает, когда спутник на-

ходится в верхней петле "восьмерки" (на рис. 4 и 5) обозначено белой пунктирной линией), и в момент синхронного переключения ретрансляционных комплексов направления от абонента на входящий и нисходящий спутники совпадают.

Синхронное переключение бортовой ретрансляционной аппара-

туры спутников, расположенных для абонента на одной линии визирования, создает эффект дрейфа спутника на PGEO без скачкообразного изменения его положения, благодаря чему в случае применения высоконаправленной антенны (например, на шлюзах) и двойного комплекта приемопередающего оборудования не требуется использование

второй антенной системы. Кроме того, угловая скорость дрейфа спутника относительно потребителя достаточно мала, что снижает требования к динамическим характеристикам системы сопровождения.

Результаты оценки точности эмуляции GEO сегментом из 4 спутников наглядно представлены на рис. 6, где отображены зоны распределения угловых девиаций спутника на PGEO в позиции примерно 100° в.д. Из рисунка видно, что на подавляющей территории зоны обслуживания угловые девиации не превышают $\pm 5^\circ$, что соответствует дрейфу геостационарного спутника с наклоном 5° .

Дальнейшие исследования показали, что на территориях выше 33° широтной отметки углы места на PGEO превышают соответствующие углы на GEO. В качестве примера на рис. 7 представлено распределение углов места для спутников в двух позициях PGEO.

Таким образом, сегмент из 4 спутников эмулирует две псевдостационарные позиции на PGEO, смещенные по долготе на 180° и расположенные на высотах от 32 000 до 40 000 км в широтном поясе 59° - 64° с.ш. или ю.ш. Время работы каждого спутника за один 12-часовой оборот составит около 6 ч. Для реализации новых псевдостационарных позиций могут развертываться другие сегменты (в том числе с другими характеристиками - например, с другим частотным планом), не требующие синхронизации и фазирования с уже развернутыми сегментами.

Сравнительная характеристика PGEO и VGEO

В качестве визуальной сравнительной оценки на рис. 8 представлена геометрическая интерпретация PGEO и VGEO. Изменение аргумента перигея базовой НЕО на 180° позволяет сформировать эти орбиты и в южном полушарии.

Как видно из рисунка, и VGEO и PGEO гарантированно освещены Солнцем, что позволяет упростить систему энергоснабжения спутника связи.



Рис. 5. Фрагмент трассы спутника на орбите "Кентавр" - "восьмерка" апогейного участка

Единственным преимуществом VGEO по сравнению с PGEO является более низкая высота расположения. Тем не менее, как уже отмечалось, проблема энергетики линий спутниковой связи в настоящее время успешно решена путем использования крупноапертурных бортовых антенных систем. В остальном PGEO имеет явные преимущества.

Преимущества PGEO

Основные преимущества PGEO, имеющие важное практическое значение, связаны с эмуляцией нового орбитально-частотного ресурса, обладающего описанными ниже свойствами.

1. Реализуется эффект GEO, расположенной в поясе широт 59-64° на высоте, 32 000-40 000 км, причем:

- не используется GEO, следовательно, упрощается процедура координации новых ССС;

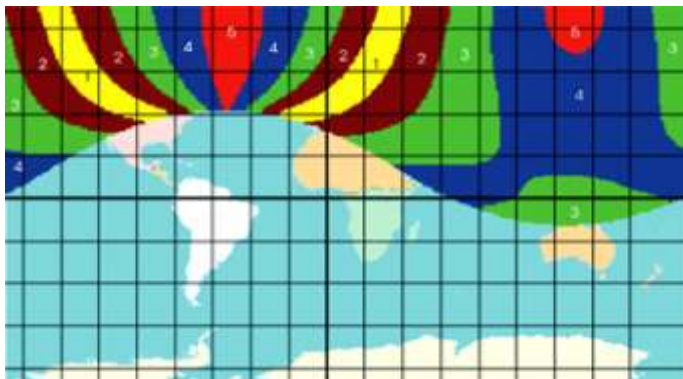


Рис. 6. Угловые девиации PGEO

- оптимальным космодромом запуска является Плесецк, что соответствует национальным интересам России.

2. Обеспечивается высокая стабильность положения спутника в псевдостационарных позициях, благодаря чему:

- дрейф спутника на PGEO соответствует дрейфу геостационарного спутника с наклоном 5° ;
- отсутствует эффект скачкообразного изменения положения спутника в момент переключения бортового оборудования связи;
- упрощаются и удешевляются наземные абонентские станции, поскольку для большинства типов абонентских терминалов не требуется система наведения и сопровождения спутника, а там, где она необходи-

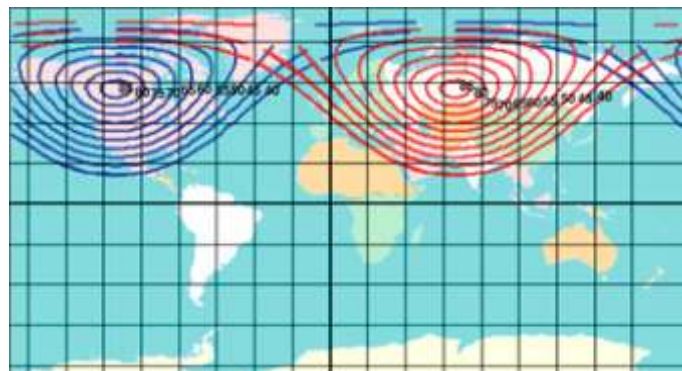
ма, требования к ее динамическим характеристикам практически соответствуют аналогичным требованиям для GEO-систем;

- упрощаются и удешевляются станции сопряжения, реализуя схему "одна станция - одна антенна" (например: Globalstar - 4 антенны, "Молния" - 2 антенны), требования к характеристикам станций близки к соответствующим требованиям для станций GEO-систем.

3. Характерные для PGEO большие углы места в средних и высоких широтах Земли способствуют:

- эксплуатации персональных, мобильных и стационарных земных станций в условиях сильнопересеченной местности и городской застройки;
- использованию ССС в России, на подавляющей территории которой углы места на GEO составляют около 20-30° даже при нулевой относительной долготе подспутниковой точки.

4. Возможность формирования новых псевдостационарных позиций несколькими сегментами из 4 спутников обеспечивает создание полноценных региональных спутниковых систем подвижной и фиксированной связи.



Terminal), а также с целью организации телевизионного и звукового непосредственного вещания для обслуживания территорий выше широты 35°.

В системах подвижной спутниковой связи ширина диаграммы направленности абонентского терминала может составлять 60°-70° при ориентации в зенит, благодаря чему обеспечивается снижение влияния подстилающей земной поверхности на качество приема сигнала со спутника, а также совместимость с системами на GEO.

Рассмотренные технологии соответствуют основным положениям концепции российской системы персональной спутниковой связи [4] и позволяют создать отечественную систе-

му региональной спутниковой связи, наиболее полно отвечающую нуждам отечественных потребителей.

Литература

1. Ефремов Г.А., Витер В.В., Липатов А.А., и др. Малые спутники в сетях связи и вещания. "Технологии и средства связи". 2000. № 1.

2. Elliptical Satellite System Which Emulates The Characteristics Of Geosynchronous Satellites. United States Patent № 5, 957, 409. Sep. 28. 1999

3. Тихонов О.С., Липатов А.А., Гриценко А.А. и др. Принципы обеспечения эффекта неподвижности спутников в северных широтах и особенности применения псевдостационарной орбиты в интересах развития систем спутниковой связи, вещания и передачи данных // International Conference on Communications IEEE / ICC2001/ St. Petersburg. 2001.

5. Зубарев Ю.Б., Симонов М.М., Аболищ А.И. Об основных положениях концепции российской системы персональной спутниковой связи Материалы 4-й Международной конференции "Спутниковая связь-2000": Тезисы доклада. - М., 2000

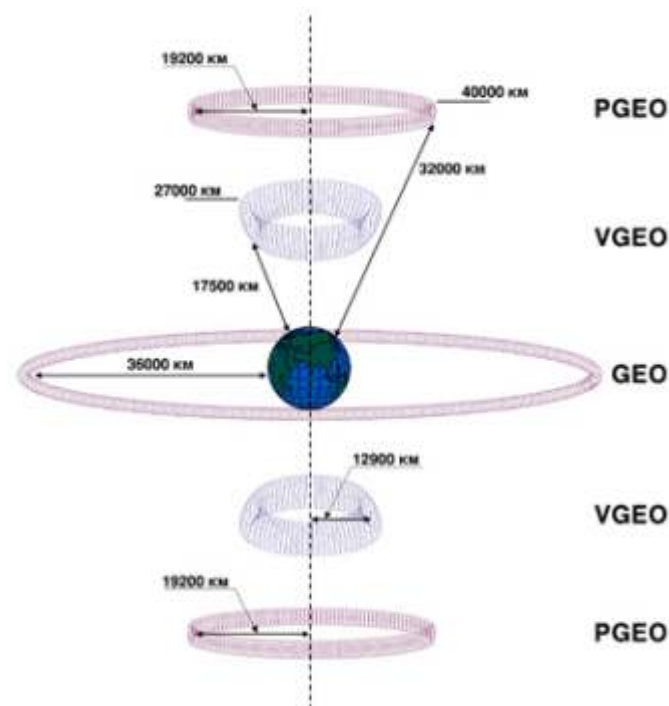


Рис. 8. Геометрическая интерпретация PGEO и VGEO

Использование PGEO

PGEO экономически целесообразно использовать для построения систем спутниковой подвижной и персональной связи, обеспечения работы терминалов класса U S A T (Ultra Small Aperture