

Виртуальные и псевдостационарные орбиты в региональных системах спутниковой связи и вещания

В. В. Витер,
первый зам. генерального конструктора, зам. генерального директора
НПО машиностроения,

О. С. Тихонов,
первый зам. директора ЛОНИИР

А. А. Липатов,
начальник отдела 16 ЦНИИ МО РФ

А. А. Гриценко,
генеральный директор
ЗАО "ИКЦ "Северная Корона"

В. А. Жиров,
ведущий эксперт
ЗАО "ИКЦ "Северная Корона"

А. А. Степанов,
начальник лаборатории 16
ЦНИИ МО РФ

Авторы анализируют возможность повышения эффективности использования орбитального ресурса с помощью создания систем спутниковой связи, использующих виртуальные (VGEO) или псевдостационарные (PGEO) спутниковые орбиты

ски привлекательным. Не случайно на фоне тяжелого положения подавляющего числа глобальных систем (Indium, Globalstar, ICO-Teledesic, Ellipse), Orbcomm продолжается динамичное развертывание новых региональных, в том числе предоставляемых услуги персональной связи (ACeS, Thuraya, Eutelsat, Inmarsat и др.).

Подавляющее большинство всех региональных систем использует геостационарную орбиту (GEO), позволяющую максимально упростить и удешевить земной сегмент: абонентские станции, станции сопряжения и управления.

Известный недостаток GEO - низкая энергетика линии связи - сегодня компенсируется использованием бортовых крупноапertureнных антенн (диаметром 12 м и выше), позволяю-

щих обеспечить работу терминалов типа "трубка в руке".

Тем не менее дальнейшее наращивание и широкое использование ССС на GEO в последнее время сдерживается следующими факторами:

- высокая концентрация на GEO действующих ССС, затрудняющих координацию новых систем;
- низкие углы места при обслуживании северных территорий, нарушающие устойчивую работу ССС в городских условиях и на пересеченной местности.

В сложившейся ситуации активизировался процесс поиска новых вариантов построения ОГ на различных орbitах с целью развертывания региональных ССС. В результате получили теоретическую известность различные типы орбит, некоторые из которых были использованы в действу-

Проблема

Современное состояние рынка спутниковой связи характеризуется жестким конкурентной борьбой за максимально эффективное использование выделенных системам спутниковой связи (ССС) ресурсов финансовых, частотных, энергетических. В конечном счете это борьба за себестоимость услуг, максимизацию загрузки ССС и получение прибыли.

В наибольшей степени на эффективность использования ресурсов влияют три основных фактора (1):

- 1) параметры орбитальной группировки (ОГ);
- 2) характеристики спутников связи;
- 3) особенности наземного комплекса ССС.

Данный материал посвящен повышению эффективности использования орбитальной группировки путем выбора оптимальных параметров ОГ.

Варианты построения ОГ региональных систем

По мнению авторов, региональные ССС относятся к наиболее коммерче-

Краткие характеристики основных типов орбит

Тип	Наименование	A, км	H _a , км	H _p , км	e	i	T, ч	Пример использования
Геосинхронные круговые								
GEO	Стационар	42 164	35 793	35 793	0	0°	24	До 90% всех систем
MEO		20 270	13 899	13 899	0	55°	8	Navstar
MEO		16 733	10 362	10 362	0	45°	6	ICO
Геосинхронные эллиптические								
HEO	Тундра	42 164	46 334	25 252	0,25	63°	24	Sirius
HEO	Молния	26 562	39 781	600	0,738	63°	12	Молния, SDS, P-Adjunct
HEO	Archimedes	20 270	27 200	600	0,656	63°	8	Virtual Geo
HEO	Odyssey	16 733	20 124	600	0,583	63°	6	Odyssey
HEO	4-часовая	12 770	12 196	600	0,454	63°	4	—
HEO	Borealis	10 541	7740	600	0,339	63°	3	Ellipse
Негеосинхронные								
MEO	Круговые орбиты с высотой от 19 000 до 20 200 км							Глонасс
LEO	Круговые орбиты с высотой от 680 до 2000 км							Iridium, Globalstar, Orbcomm, Гонец
Примечания.								
A – большая полуось;		e – эксцентриситет;		GEO – Geostationary Earth Orbit;				
H _a – высота апогея;		i – наклонение;		HEO – High Elliptical Orbit;				
H _p – высота перигея;		T – период обращения;		MEO – Medium Earth Orbit;				
				LEO – Low Earth Orbit				

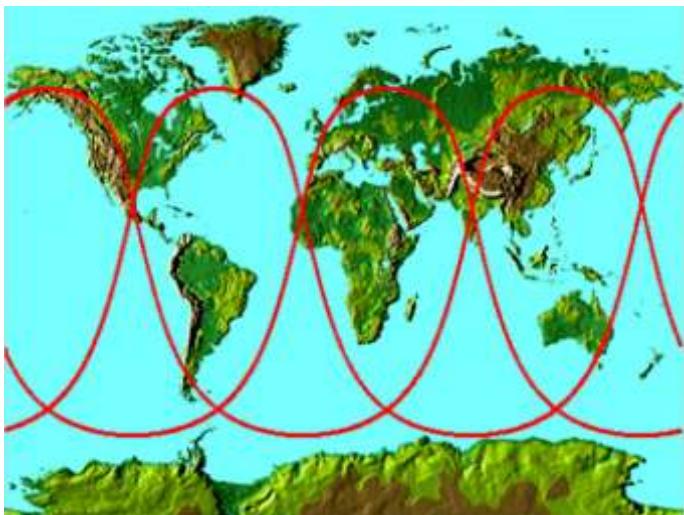


Рис. 1. Трасса HEO Odyssey

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 (HEO).

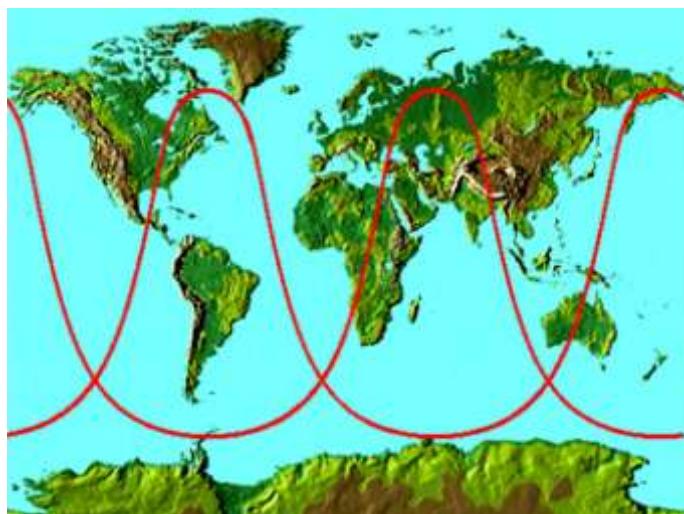


Рис. 2. Трасса HEO Archimedes

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 с находящимся спутником 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 представлены примеры трасс движения спутников на этих орbitах.

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 наклонением 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-

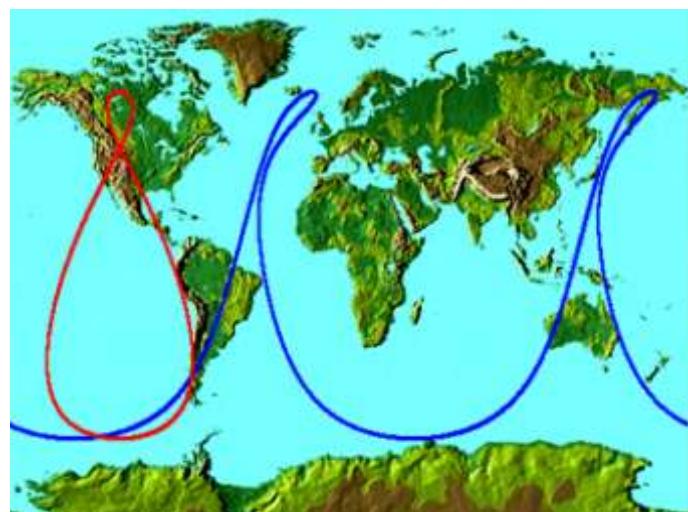


Рис. 3. Трассы НЕО "Молния" (синяя линия) и "Тундра" (красная линия)

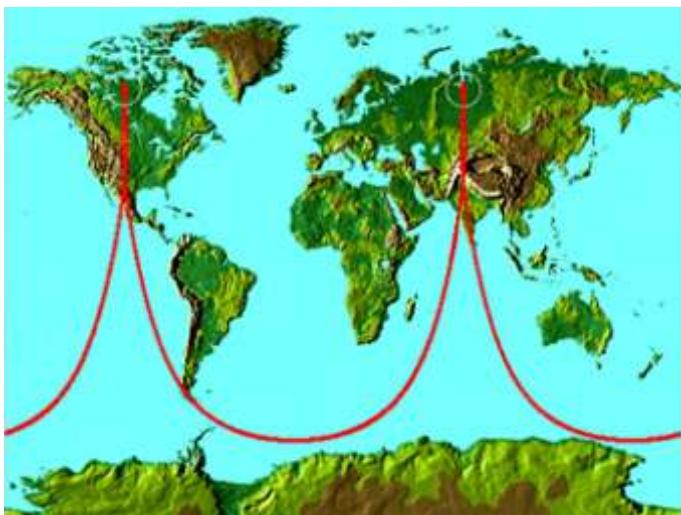


Рис. 4. Трасса спутника на орбите "Кентавр"

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 аппаратуры 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 наклонением 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, смешанные 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 peri-гея 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 крупноапertureных бортовых антennных 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;

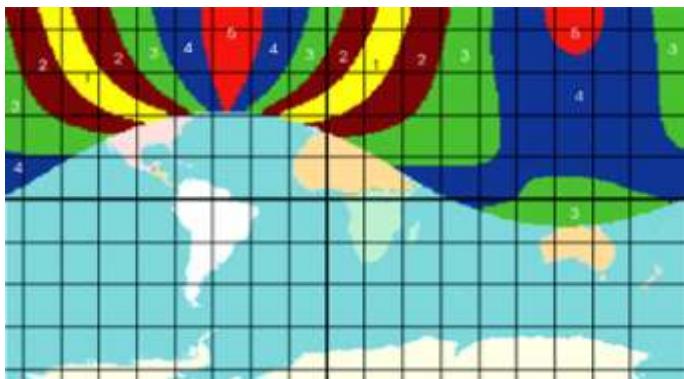


Рис. 6. Угловые девиации РГЕО

- оптимальным космодромом запуска является Плесецк, что соответствует национальным интересам России.
- 2. Обеспечивается высокая стабильность положения спутника в псевдостационарных позициях, благодаря чему:
 - дрейф спутника на РГЕО соответствует дрейфу геостационарного спутника с наклонением 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 необходима, реализуется в виде простого приемо-передатчика.

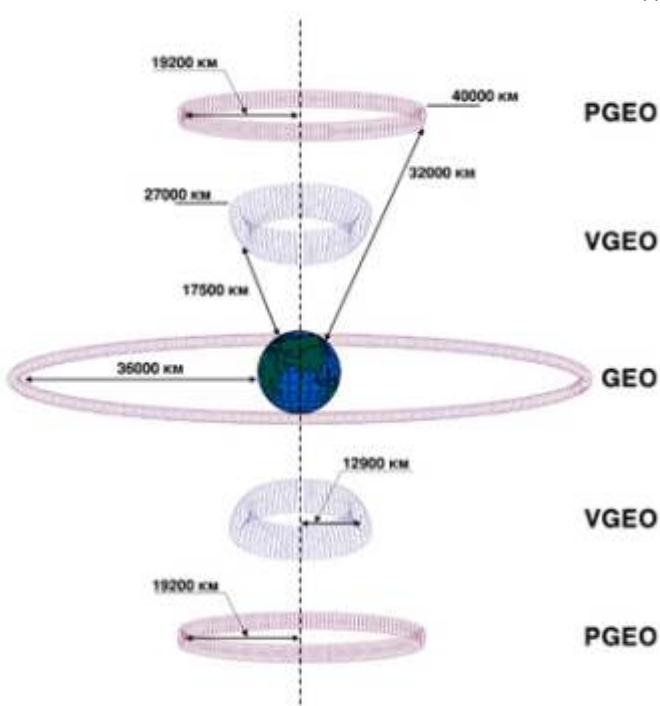


Рис. 8. Геометрическая интерпретация РГЕО и ВГЕО

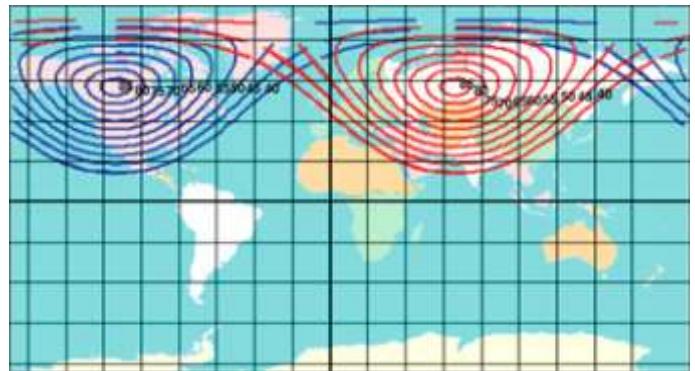
ма, требования к ее динамическим характеристикам практически соответствуют аналогичным требованиям для GEO-систем;

- 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.

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 zenith, 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 систему



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

- эксплуатации персональных, мобильных и стационарных земных станций в условиях сильно пересеченной 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.

Использование РГЕО

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

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., Абелиц А.И. Об основных положениях концепции российской системы персональной спутниковой связи Материалы 4-й Международной конференции "Спутниковая связь-2000": Тезисы доклада.- М., 2000