

# РАДИОТЕХНИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ

УДК 629.78.051.621.396.98

## ТЕНДЕНЦИИ И ОСОБЕННОСТИ РАЗВИТИЯ СПУТНИКОВЫХ СИСТЕМ

Н.Е. Армизонов, А.Н. Армизонов

### Часть 1

*Приводится наметившаяся сегодня концепция развития современных спутниковых систем в направлении интеграции функций по предоставлению пользователям-абонентам услуг навигации, геодезии, связи, наблюдения и управления в единой глобальной многофункциональной спутниковой системе автономного функционирования.*

*Ключевые слова: спутниковая система, искусственный спутник Земли, фазовый центр антенны, навигация, геодезия, гравитация, связь*

Спутниковые системы до настоящего времени создаются и развиваются по узкоцелевым тематическим направлениям навигации, связи, геодезии. Во многом состояние неэффективного применения существующих систем узкоцелевого направления усугубляется неопределенностью их коммерческой эффективности. Видимо по этой причине существует множество проектов, не выходящих за рамки предложений для практической реализации.

Реально пользователи спутниковых систем нуждаются в услугах глобальной многофункциональной интегрированной спутниковой системы (МИСС), в которой интегрированы функции геодезии, навигации, связи, наблюдения и управления. Им не выгодно иметь дело со многими, не совмещенными друг с другом, спутниковыми системами. Соответственно, государству невыгодно содержать множество систем с их дорогой наземной инфраструктурой и неинтересно иметь бесприбыльные системы, не используемые мировым сообществом и слабо используемые внутри страны. И, тем не менее, современные спутниковые системы сегодня представляют собой одну из наиболее динамично развивающихся областей мировых телекоммуникаций. Общее состояние современного мирового рынка телекоммуникаций и прогнозы его развития в ближайшем будущем показывают, что ведущей тенденцией является все большая персонализация, индивидуализация и гло-

бализация предоставляемых услуг. Именно в этих направлениях системы имеют наибольший потенциал развития. Это на сегодня главнейшее направление развития спутниковых систем.

С точки зрения конечного пользователя, это означает, что он может, находясь в любой точке Земного шара, стационарно или в движении, в любое время, получить необходимую для него услугу, например, связи и навигации по приемлемым ценам. Этот путь позволяет не только существенно повысить функциональные возможности спутниковых систем и, соответственно, расширить перечень и объем услуг, предоставляемых конечным пользователям, но и снизить стоимость услуг. А это, в свою очередь, является важнейшим условием повышения конкурентоспособности спутниковых систем.

Одновременно современные потребности пользователей, например, сотовых систем связи и конкуренция заставляют операторов мобильной связи настойчиво бороться за расширение номенклатуры предоставляемых услуг и повышение их качества. Среди первоочередных требований, предъявляемых к системам мобильной связи (СМС), – глобальная мобильность систем и определение координат местоположения. В соответствии с этим требованием мобильные абоненты-пользователи должны иметь возможность с необходимой точностью и при за-

данном уровне безопасности без каких-либо ограничений иметь возможность доступа к привычному набору услуг, находясь за пределами своей локальной зоны. Быстрый рост числа пользователей мобильной связи во всем мире свидетельствует об их желании и настоятельной потребности сохранять возможность постоянного контакта. При этом среди всех СМС уместно выделить системы персональной спутниковой связи и навигации между мобильными абонентами. Пользователи таких систем, перемещаясь из зоны в зону или находясь в отдаленных зонах, могут обмениваться информацией друг с другом, как если бы они находились в одной зоне, например, в зоне городской сотовой связи. Видимо в ближайшей перспективе следует ожидать появления новой конкурентоспособной концепции, отражающей данные тенденции в рамках глобальной МИСС связи, навигации, геодезии, наблюдения и управления.

Развитие спутниковых системы таково, что настал момент коренного пересмотра идеологии построения систем в направлении интеграции функций и предоставления пользователям комплексных услуг. По мнению большинства зарубежных аналитиков, уже в самом начале XXI века мировое сообщество на базе этого совершит переход к глобальному информационному сообществу. Главное преимущество глобальной МИСС перед действующими в настоящее время спутниковыми и наземными системами телекоммуникаций – это то, что МИСС может обеспечивать непосредственное и персональное обслуживание пользователей-абонентов широким спектром современных коммуникационных услуг во всемирном масштабе, в любой точке Земли – вне зависимости от плотности населения и наличия развитой инфраструктуры. Поэтому интеграция спутниковых систем не является самоцелью, а имеет определенные технические и экономические основания.

Одно из «узких мест» на пути развития спутниковых систем – это весьма ограниченный естественный частотно-орбитальный ресурс, который может быть использован этими системами, а также проблемы несанкционированного использования спутниковых радиолиний, обеспечения

защищенности радиолиний и селективного доступа. Эти проблемы типичны для всех радиосистем, поскольку в них, в отличие от проводных (кабельных) линий, демаскирующие признаки доминируют не в топологической, а в информационно-сигнальной области.

В сложившейся обстановке, когда происходит стремительный рост коммерческого и военного применения радиолиний, остро стоят вопросы, связанные с обеспечением государственной безопасности, с распределением и использованием радиочастотного спектра. Радиоспектр является весьма ценным и ограниченным природным ресурсом, а частоты являются общим знаменателем всех систем радиоэлектроники.

Сегодня почти все спутники связи – геостационарные, поскольку это обеспечивает непрерывность связи и исключает для небольших антенн необходимость слежения за спутниками. Геостационарная орбита (ГСО) – единственная и уникальная, ее перегрузка спутниками связи общеизвестна, размещение на ГСО каждого нового спутника – всегда проблема.

Сегодня невозможно получить и официально закрепить орбитальный частотный ресурс, необходимый для создания новой системы и запуска нового спутника в освоенных и разрешенных для использования полосах частот. Более того, все больший уровень помех испытывают работающие спутниковые сети, прошедшие все этапы координации и регистрации.

Естественным путем разрешения проблемы перегрузки ГСО представляется использование негеостационарных орбит. Попытки, например, использования низких орбит для подвижной и фиксированной спутниковой связи окончились неудачей по причине недостаточной экономической эффективности. Следует заметить, что попытки создания эффективных систем передачи данных с низколетающими спутниками продолжаются, но уже без грандиозного размаха.

Дороговизна низкоорбитальных систем подвижной связи обусловлена одновременно чрезвычайно высокой сложностью спутниковых, а особенно наземных сегментов, высокими эксплуатационными расходами на

развертывание орбитальной группировки и ее поддержание в работоспособном состоянии, что, в конечном итоге, увеличивает стоимость услуг.

Другим естественным путем разрешения проблемы перегрузки ГСО представляется использование негеостационарных средних орбит с периодом обращения, например, 12 часов, а конкретнее, орбит спутников GPS и свободных диапазонов частот, например, 3 кГц и ниже с применением наноантенн, наноантенных решеток.

Одновременно развитие телекоммуникационного рынка характеризуется пока несомненными успехами, в результате чего, например, объем услуг сотовой радиотелефонной связи сегодня в России стал соизмеримым с объемом продукции природно-ресурсных отраслей экономики.

Очевидно, далеко не каждому интересно, чем чревато быстрое развитие беспроводной инфраструктуры. В крупных городах в настоящее время сложилась такая ситуация, когда суммарная мощность электромагнитного излучения (ЭМИ) абонентских и базовых станций сетей сотовой связи приближается к мощности всех других передающих радиотехнических объектов в диапазоне частот от 300 МГц до 30 ГГц и в ближайшее время превысит ее.

Несложные расчеты показывают, что уже при средней выходной мощности радиотелефона 30 мВт на расстоянии 5 см уровень плотности потока мощности (ППМ) превышает 100 мкВт/см<sup>2</sup>. А суть экологической проблемы заключается в следующем. В процессе вызова, например, телефон сотовой связи ищет ближайшую базовую станцию и устанавливает выходную мощность в зависимости от ее удаленности и своей чувствительности. Известно также, что мощность иного сотового телефона в момент соединения может достигать 2 Вт (правда, потом она падает), а для аналоговых стандартов и того больше. А это, если телефон приложить к голове, серьезно превышает то, что тот же пользователь получает от своей бытовой СВЧ печи, на которую голову обычно не кладет. Очевидно также воздействие электромагнитного излучения и базовых станций как источников вынужденного экологического риска. В настоящее время по-

давляющее большинство ученых считает, что электромагнитное излучение отрицательно влияет на здоровье человека и является причиной целого ряда заболеваний, в первую очередь онкологических, нервной и сердечнососудистой систем.

После опубликования окончательных результатов исследований влияния электромагнитного излучения телефонов мобильной связи на здоровье пользователей наступит переломный момент конкурентной борьбы между спутниковыми и наземными системами, а также различными спутниковыми системами. Победит тот, кто первым предложит абонентам систему, мобильные телефоны которой будут излучать на порядок меньшую мощность, например, не 50...30 мВт, а 5...3 мВт и менее. А также ту систему, которая позволит абонентам с высокой точностью осуществлять навигацию как в городских условиях, так и в лесу, под водой, под землей, в условиях открытой местности [1].

Для разработчиков спутниковых систем тенденция обеспечения все большей персонализации и индивидуализации услуг, вплоть до предоставления любому абоненту любого индивидуального набора услуг в любое время, в любой точке Земли, с требуемым качеством и по приемлемой цене, трансформируется в техническую тенденцию «сложный спутник – простые земные мобильные и стационарные терминалы», означающую перенос все большего количества функций и энергетической нагрузки на спутниковые сегменты. А отсюда проистекает всемерное упрощение, уменьшение габаритов, массы и стоимости наземных терминалов абонентов, а также максимальное упрощение наземных средств, в частности, исключение из сферы предоставления телекоммуникационных услуг посредников – операторов.

Происходит постоянное усовершенствование и удешевление технологии управления современными спутниками в процессе их эксплуатации на орбитах, характеризующееся переносом все большего количества функций управления на борт спутников, оборудованных мощными бортовыми процессорами, обеспечивающими минимизацию объема привлечения наземных средств

для текущего управления спутниками. Это, в свою очередь, позволяет увеличить автономность функционирования спутников и, за счет меньшего объема применения земных средств, значительно снизить экономические затраты на управление спутниками.

Одновременно потребности современной жизни и деятельности человека с учетом потребности рынка в услугах высокоточной оперативной навигации и связи, особенно в городских условиях, а также в услугах геодезии и обеспечения безопасности любых пользователей-абонентов, терпящих бедствие на воде, в воздухе и на суше в любой точке Земного шара, все настойчивее заставляют специалистов искать возможности создания автономной глобальной МИСС навигации, связи, геодезии, наблюдения и управления, в том числе и глобальной телефонной сети.

В настоящее время обеспечение навигации для абонентов играет важную роль среди различных телекоммуникационных услуг, ставших доступными в современной мобильной и фиксированной связи. В особенности активно исследуются возможности реализации этого сервиса в сотовой связи.

Таким образом, наметившиеся сегодня тенденции развития современных спутниковых систем – перенос все большего количества функций и энергетической нагрузки на спутниковый сегмент, позволит обеспечить одновременно и персонализацию, индивидуализацию услуг, и электромагнитную безопасность населения, пользователей спутниковых систем.

С момента начала запусков искусственных спутников Земли самого различного назначения на околоземном пространстве накопилось достаточно большое количество ИСЗ, которое с каждым годом стремительно растет. Уже в XXI столетии встанет вопрос утилизации ИСЗ, так как они станут помехой человеческой деятельности в околоземном пространстве. Таким образом, также остро стоит задача снижения темпа «загрязнения» околоземного пространства.

Как видим, рассмотренные предпосылки создания перспективных спутниковых систем привели к однозначному видению облика системы как автономно функционирующей, глобальной многофункциональной,

системы, предоставляющей пользователям в едином информационном канале услуги навигации, геодезии, связи, наблюдения и управления.

Ниже представляется инженерная реализация концепции глобальной МИСС навигации, связи, наблюдения и управления автономного функционирования на базе эволюционной модернизации американской спутниковой системы Global Positioning System (GPS), которая в дальнейшем обеспечит повышение социально-экономического эффекта практически для всех видов пользователей, а также предоставит возможность абонентам избирательно получать нужную комплексную информацию с использованием унифицированного пользовательского терминала, адаптированного к индивидуальным запросам.

#### **Концепция перспективной автономной глобальной многофункциональной интегрированной спутниковой системы**

До настоящего времени не сложилась четкая классификация методов обсервации с применением спутников, не выработаны принципы их наименования. Некоторые реализации методов названы по непосредственно измеренным параметрам, другие – по поступающим на обработку параметрам для вычисления координат. Современная реализация навигационных и геодезических определений в алгоритмах аппаратуры пользователей спутниковых систем основана на методе линий положения. В общем, это видимо, следует признать оправданием, с одной стороны, из-за необходимости быстрого создания систем и, с другой стороны, из-за сравнительно ограниченных на этапе становления спутниковых систем возможностей вычислительной техники в приемлемых для пользователей реализациях и ее стоимости.

В современных глобальных спутниковых радионавигационных системах (СРНС) навигационные искусственные спутники Земли (НИСЗ) являются аналогом неподвижных радионавигационных точек (РНТ), представляющих собой опорные пункты наземных радионавигационных систем, коор-

динаты которых определяются на Земле по результатам измерений наземными измерительными комплексами, прогнозируются на необходимый период времени и закладываются на борт каждого НИСЗ. Перенос РНТ из наземных точек с фиксированными географическими координатами в точки, совершающие орбитальное движение, и определяет в основном все трудности для достижения требуемой точности навигационных определений пользователями в целом, а особенно в режиме автономного функционирования СРНС [2].

Рассматриваемые ниже алгоритмы автономной мгновенной спутниковой геодезии и навигации позволяют отказаться от измерений и прогнозирования движения спутников наземными измерительными комплексами вообще или производить определение координат спутников (фазовых центров антенн источников излучения радиосигналов) в моменты измерений пользователями навигационных параметров для определения координат своего местонахождения. То есть повышение точности навигационных определений может быть достигнуто путем реализации режима автономного функционирования спутниковых систем с использованием несущих частот радиосигналов, например, спутниковых связных или других систем.

Другим направлением повышения точности навигационных определений являются, например, прямые измерения геопотенциала Земли (геоцентрического радиус-вектора) также непосредственно в процессе навигационных сеансов. Прямые измерения при наблюдениях ограничат влияние динамики поверхностей Земли, океанов, обусловленной природными явлениями (приливами, отливами, землетрясениями, техногенными катаклизмами) на точность решения геодезических и навигационных задач.

Дальнейшее повышение точности навигационных определений, например, в GPS, в связи с возросшими требованиями, проблематично. Система «обросла» всевозможными дифференциальными дополнениями, системами межспутниковых измерений, другими системами, но желаемого результата нет и не будет. С точки зрения практической навигации это вполне оправдано, пока

затраты и практичность применения не вступили в противоречие.

Видимо в ближайшей перспективе следует ожидать появления новой конкурентоспособной концепции, отражающей данные тенденции в рамках глобальной интегрированной спутниковой системы навигации, геодезии, связи, наблюдения и управления.

Необходимо помнить, что точность навигационных измерений и определений в СРНС с использованием точных средств не выше точности используемых методов. Дальнейшее повышение точности с целью повышения конкурентоспособности спутниковых систем в части навигации, геодезии, связи, наблюдения и управления, возможно только за счет разработки и внедрения новых методов – новых алгоритмов навигационных измерений и определений.

Поэтому цель работы – разработать алгоритмы измерений и автономного мгновенного определения пользователями-абонентами своего местоположения угловой ориентации, поправки компаса по фазе несущей радиосигналов наземных радиомаяков, ретранслируемых спутниками, исключющие технологию определения эфемерид, прогнозирование и закладку их наземными средствами на борт каждого навигационного спутника с использованием только несущих частот радиосигналов. Тем самым будет обеспечена возможность создания конкурентоспособной ГИСС навигации, геодезии, связи, наблюдения и управления, обеспечивающей высокую точность геодезических и навигационных определений пользователей-абонентов, достоверность, надежность, экономическую эффективность, рыночную привлекательность и эффективное использование в целом невосполнимого мирового ресурса, каким является радиочастотный спектр и спутниковые орбиты.

Во всех реализованных в настоящее время и изложенных в литературе методах геодезических и навигационных определений с применением спутников также практически не уделяется внимание возможности, например, прямых измерений радионавигационных параметров с учетом форм и размеров Земли, измерений расхождения шкал времени в радиолиниях «радиомаяк – спутник», «спутник – пользователь» и авто-

номного определения пользователями своего местоположения без использования наземных измерительных средств. На решение именно этих вопросов и организации в едином информационном канале кроме услуг навигации, геодезии, связи, наблюдения и управления, представленных в глобальной МИСС автономного функционирования, направлены разработанные алгоритмы геодезических навигационных измерений и определений, а также на решение вопросов организации связи, наблюдения и управления.

Сущность предложенных алгоритмов автономной мгновенной спутниковой геодезии и навигации заключается в следующем. Сетью простейших автоматических автономных радиомаяков, размещенных на поверхности Земли таким образом, чтобы в зоне радиовидимости каждого спутника непрерывно находилось не менее одного, двух, трех радиомаяков, непрерывно излучающих радиосигналы. В качестве радиомаяков могут быть использованы, например, существующие действующие стационарные терминалы спутниковых и наземных систем связи и других систем.

К радиомаякам предъявляются следующие основные требования:

- непрерывно излучаемые сигналы радиомаяков должны содержать информацию о системной шкале времени (СШВ) и иметь собственную шкалу времени;
- радиомаяки должны излучать сигналы достаточной мощности для уверенного приема приемными устройствами спутниковых ретрансляторов;
- ретранслируемые спутниками сигналы должны иметь информацию о бортовой шкале времени (БШВ) спутников, принадлежности сигналов к соответствующим радиомаякам или терминалам;
- с достаточной точностью должны быть известны координаты местоположения радиомаяков (фазовых центров антенн), которые при производстве аппаратуры пользователей (АП) записываются в их запоминающие устройства.

Приемные устройства спутниковых ретрансляторов (ПУСР) непрерывно принимают радиосигналы от одного, двух и более радиомаяков, находящихся в зоне радиовидимости. С помощью информации об изме-

нении принимаемых частот несущих, имеющейся в цепях управления частотами генераторов, управляемых напряжением (ГУН) схем слежения за несущими (ССН) на краях и в серединах мерных интервалов в системах отсчета времени спутников, эти сигналы модулируются, усиливаются и затем излучаются (ретранслируются) в направлении Земли. При этом сигналы радиомаяками могут излучаться в одном частотном диапазоне, а ретранслироваться спутниками в другом.

Для определения координат и составляющих вектора скорости пользователя производится одновременный прием уже ретранслированных сигналов радиомаяков от одного, двух и более спутников, выделяется информация о принадлежности сигналов соответствующим радиомаякам и информация ССН об изменениях принимаемых несущих частот сигналов ПУСР, а также фиксируется информация об изменении значений несущих на краях и в серединах мерных интервалов, имеющиеся также в цепях управления ГУН ССН АП. Выделенная и зафиксированная информация в АП позволяет произвести вычисления навигационных параметров, которые в свою очередь позволяют установить навигационные зависимости между известными значениями координат и значениями направляющих косинусов векторов положения радиомаяков и неизвестными значениями координат и значениями направляющих косинусов векторов положения спутников (фазовых центров спутниковых антенн). В результате решения системы навигационных уравнений в аппаратуре абонентов-пользователей определяются координаты и значения направляющих косинусов векторов положения спутников (эфемериды). Затем устанавливаются функциональные зависимости между известными значениями координат, значениями направляющих косинусов векторов положения спутников и неизвестными значениями координат, значениями направляющих косинусов векторов положения пользователей. С применением алгоритмов дальномерного, комбинированного и угломерного методов определяются координаты и составляющие вектора скорости, как спутников, так и пользователей, а также значения направ-

ляющих косинусов векторов положения спутников и пользователей. Причем значения направляющих косинусов векторов положения пользователей позволяют, в свою очередь, реализовать решения геодезической навигационной задачи без знания координат местоположения фазовых центров антенн ретрансляторов радиосигналов спутников (эфмерид) с использованием только известных координат радиомаяков, записанных в запоминающие устройства аппаратуры пользователей при ее изготовлении.

Геодезическое использование разработанных алгоритмов становится возможным благодаря наличию методологической общности решения задач навигации и геодезии, выражающейся в определении навигационных параметров по фазовым измерениям, обусловленным эффектом Доплера, и по известным координатам фазовых центров антенн наземных радиомаяков. Это позволяет использовать аппаратуру пользователей для решения и геодезических, и навигационных задач.

Навигационные решения отличаются от решения геодезических задач требованием практически немедленно после завершения цикла геодезических измерений и определений употреблять их в пользовательских терминалах в качестве исходных данных для решения своих целевых задач. Это обстоятельство является одним из определяющих для разработки глобальной МИСС автономного функционирования, способов обработки измерений, документирования результатов и других аспектов всего использования разработанных алгоритмов.

При применении разработанных алгоритмов автономного определения абонентами своего местоположения отпадает необходимость как определять эфмериды спутников наземными средствами, закладывать их на борт каждого спутника, так и передавать каждым спутником собственные навигационные сообщения, на основе которых в действующей в настоящее время пользовательской аппаратуре спутниковых систем производится решение навигационной задачи.

Разработанные методы инженерной реализации концепции перспективной автономной глобальной МИСС позволяют организовать и технически реализовать два ва-

рианта определения эфмерид спутников: иноопределение и самоопределение. Эти варианты различаются, прежде всего, тем, в каком из элементов системы решается задача определения эфмерид спутников, и чем это обусловлено. При решении задачи определения координат спутников в пользовательском терминале (вариант самоопределения), несущие частоты радиосигналов НРМ и навигационная информация (значения навигационных параметров) спутниками только ретранслируется, а информация о координатах всех радиомаяков записывается в запоминающие устройства аппаратуры пользователей. Все это обусловлено тем, что в любой момент времени в зоне радиовидимости каждого спутника всегда находится от одного до трех НРМ.

Когда нет возможности разместить НРМ на территории других государств, спутниковая система может также эффективно работать, но теперь только по несущим частотам радиосигналов маяков, размещенных на собственной территории. В этом случае координаты спутников определяются на борту каждого спутника (вариант иноопределения) с использованием информации об изменении принимаемых частот несущих сигналов радиомаяков, имеющейся в цепях управления частотами ГУН ССН ПУСР, и координат радиомаяков, записанных в запоминающие устройства ПУСР с применением бортового вычислительного комплекса (БВК) [3]. При этом определяются:

- скорости фазовых центров антенн ПУСР;
- значения дальностей от фазовых центров антенн ПУСР до фазовых центров антенн одного – трех радиомаяков;
- модули вектора положения фазовых центров антенн ПУСР;
- три проекции векторов скорости спутников на оси геоцентрической системы координат;
- три значения направляющих косинусов векторов положения фазового центра антенны ПУСР (начальных условий для интегрирования уравнений движений спутников).

Затем определяются координаты спутников, прогнозируются на фиксированные (опорные) моменты времени, например, на середину каждого получасового интервала

предстоящих суток, модулируются этой информацией несущие радиосигналов, усиливаются и ретранслируются в направлении Земли. Этот режим работы спутников не является сложной проблемой, так как измерительный комплекс спутников представляет собой аналог аппаратуры пользователей и может быть достаточно малогабаритным и экономичным. Требования к быстродействию и объему памяти БВК весьма не жесткие, поскольку задача на борту спутников решается в реальном масштабе времени методами последовательного уточнения оценок, и дискретность выдачи текущих координат спутников пользователям не высокая.

В аппаратуре пользователей по прогнозируемым данным на фиксированные моменты времени осуществляется последующее прогнозирование, но уже текущих значений координат спутников, их производных в интервалах между опорными точками траектории, а затем определяются координаты пользователя.

Например, для 12-спутниковой американской GPS, спутники которой размещены по два равностоящих от друг друга на  $180^\circ$  в шести орбитальных плоскостях, сдвинутых по долготе на  $60^\circ$  и наклоненных к плоскости экватора под углом  $55^\circ$ , период обращения получается таким, что каждый спутник проходит над одними и теми же наземными радиомаяками через звездные сутки (23 часа 55 минут 56,6 секунды). То есть при работе GPS в автономном режиме по радиомаякам, размещенным только на территории США, передаваемые со спутников эфемериды в режиме самоопределения будут обновляться каждые сутки.

Вариант иноопределения легко трансформируется в вариант самоопределения в случае, когда имеющаяся информация в цепях ГУН ССН ПУСР ретранслируется пользователям, а пользователи в своем терминале производят как первичное, так и вторичное прогнозирование, затем определяют координаты спутников и собственные координаты.

При реализации принципа построения автономной спутниковой геодезии и навигации с использованием угломерного метода координаты спутников (эфемериды) в явном виде вообще не используются. Используются

только значения направляющих косинусов векторов положения спутников, а для решения навигационной задачи достаточно измерять (фиксировать), прогнозировать и ретранслировать только информацию об изменении несущих частот используемых радиосигналов (приращения фаз) в радиолиниях. В этом случае, в варианте самоопределения, спутниковая система в рассматриваемых алгоритмах уже не является подвижной глобальной системой координат. Поэтому алгоритмы могут быть использованы для установления глобальных координатных связей, выявления действительной формы и размеров Земли, начала размещения геоцентрической системы координат (центра масс Земли), то есть для решения кардинальных задач, стоящих перед геодезией, например, съемки карты гравитационного поля Земли и других задач. Серия дифференциально-доплеровских измерений позволяет также сформировать систему линейных уравнений первоначального определения как местоположения опорных геодезических пунктов, так и местоположения пользователей.

Реально гравитационное поле Земли не является постоянным. Оно непрерывно изменяется, проявляя характер «живого» существа. Поэтому под действием этих проявлений каждые спутниковые орбиты – сложнейшие незамкнутые кривые, отличные друг от друга. Это обстоятельство всегда имело место, но не было столь актуальным, как в настоящее время. Поэтому в принципе, создание как таковой стационарной карты гравитационного поля Земли невозможно. Каждый раз, когда необходимо оценить состояние гравитационного поля Земли, масштабирующим параметром которого является геоцентрическая гравитационная постоянная, необходимо мгновенно в требуемых точках пространства в требуемое время измерить ее реальные значения с высокой точностью.

Значение гравитационной постоянной Земли равно произведению абсолютной гравитационной постоянной на массу Земли. Абсолютная же гравитационная постоянная – это коэффициент пропорциональности в математическом выражении закона всемирного тяготения.

Главным возмущающим фактором движения спутника (фазового центра спутниковой антенны) являются гравитационные возмущения, вызванные отличием поля притяжения Земли от поля притяжения точечной массы (спутника). То есть каждому значению скалярного аргумента  $\mu$  ставится в соответствие, например, вектор положения фазового центра спутниковой антенны  $(R_3 + H)(\mu)$ , помещенный в центр масс Земли. И наоборот, при радиотехнических измерениях конец радиус-вектора  $(R_3 + H)(\mu)$  описывает пространственную кривую (траекторию) движения фазового центра спутниковой антенны. Если  $(R_3 + H)(\mu)$  разложить по базисным векторам  $i, j, k$  прямоугольной декартовой геоцентрической системы координат, то

$$(R_3 + H)(\mu) = X_c(\mu)i + Y_c(\mu)j + Z_c(\mu)k,$$

причем компоненты  $X_c(\mu), Y_c(\mu), Z_c(\mu)$  являются функциями от  $\mu$ . Параметрическое представление пространственной кривой (годографа) или траектории движения фазового центра спутниковой антенны имеет вид:

$$X = X_c(\mu);$$

$$Y = Y_c(\mu);$$

$$Z = Z_c(\mu),$$

где  $X_c, Y_c, Z_c$  – координаты фазовых центров спутниковых антенн.

Производя одновременные измерения значений модуля радиус-вектора  $(R_3 + H)$  – вектора положения фазового центра спутниковой антенны, значений геоцентрической гравитационной постоянной в точках пространства, в которых размещены фазовые центры антенн, и определение пространственных координат их местоположения, можно построить карту гравитационного поля Земли, в виде функциональных зависимостей:

$$\mu^{\text{пр.с}} = f(X_c, Y_c, Z_c)$$

или 
$$\mu^{\text{пр.п}} = f(X_c, Y_c, Z_c);$$

$$(R_3 + H_i)^{\text{пр.с}} = f(\mu^{\text{пр.с}}),$$

или 
$$(R_3 + H_i)^{\text{пр.п}} = f(\mu^{\text{пр.п}});$$

$$(R_3 + H_i)^{\text{пр.с}} = f(X_c, Y_c, Z_c),$$

или 
$$(R_3 + H_i)^{\text{пр.п}} = f(X_c, Y_c, Z_c),$$

или 
$$\mu^{\text{пр.с}} = f(R_3 + H_i)^{\text{пр.с}},$$

или 
$$\mu^{\text{пр.п}} = f(R_3 + H_i)^{\text{пр.п}},$$

где  $\mu^{\text{пр.с}}, \mu^{\text{пр.п}}$  – значения геоцентрической гравитационной постоянной, измеренные с использованием спутниковой приемной измерительной аппаратуры и наземной приемной измерительной аппаратуры (пользовательскими терминалами) соответственно.

Имея карту гравитационного поля Земли, можно определить фигуру Земли (отличие поля притяжения Земли от поля притяжения точечной массы), изменения уровня поверхностей морей и океанов, изучить техногенные явления и характер этих явлений. Поверхности уровня значений геоцентрической гравитационной постоянной – это поверхности в пространстве, на которых  $\mu$  обладает постоянным значением. Они описываются уравнениями

$$\mu(X_c, Y_c, Z_c) = \text{const},$$

где  $X_c, Y_c, Z_c$  – координаты фазового центра спутниковой антенны в геоцентрической системе координат. В центральном поле все поверхности сферы с центром в начале координат, размещенном в центре масс Земли, являются поверхностями уровня. В отдельных случаях линии уровня могут вырождаться в точки, а поверхности уровня – в точки или линии.

Таким образом, чтобы произвести съемку карты гравитационного поля Земли, необходимо произвести измерения значений геоцентрической гравитационной постоянной в пространстве с использованием спутниковой приемно-измерительной аппаратуры или наземной приемно-измерительной аппаратуры, значений модуля геоцентрического радиус-вектора  $(R_3 + H_i)^{\text{пр.с}}, (R_3 + H_i)^{\text{пр.п}}$ , а также необходимо произвести одновременное определение координат фа-

зовых центров спутниковых приемных антенн, антенн, ретранслирующих радиосигналы наземных радиомаяков (НРМ), и антенн пользовательских терминалов (пользователей). Только в этом случае можно произвести мгновенную глобальную съемку карты гравитационного поля Земли и определить реальные конкретные значения, например, аномалии гравитационного поля Земли, фигуру Земли и другие параметры [4].

### Заключение

Развитие спутниковых систем в настоящее время таково, что настал момент коренного пересмотра идеологии построения систем в направлении интеграции функций и предоставления пользователям услуг навигации, геодезии, связи, наблюдения и управления в единой глобальной многофункциональной спутниковой системе автономного функционирования. По мнению большинства зарубежных аналитиков, уже в самом начале XXI века мировое сообщество на базе этого совершит переход к так называемому GIS – «глобальному информационному сообществу». Главное преимущество глобальной интегрированной спутниковой системы (ГИСС) перед действующими в настоящее время спутниковыми и наземными системами телекоммуникаций в конкурентной борьбе в современных усло-

виях – это то, что ГИСС может обеспечить непосредственное и персональное обслуживание конечных пользователей-абонентов широким спектром современных коммуникационных услуг во всемирном масштабе в любой точке Земли вне зависимости от плотности населения и наличия развитой инфраструктуры. Спутниковые системы – уникальные инструменты перехода человечества к глобальному информационному обществу. При этом под информационным понимается общество, в котором знания и информация составляют значительную долю национального продукта.

### Литература

1. Головки А.В., Сомов А.Ю. Проблемы эколого-технического развития сетей сотовой связи // Вестник связи, 2003, № 10.
2. Шебшаевич В.С. Сетевые спутниковые радионавигационные системы. – М.: Радио и связь, 1993.
3. Цифровые радиоприемные системы / Справочник под редакцией М.И. Жодзитского. – М.: Радио и связь, 1990.
4. Армизонов Н.Е., Козлов А.Г. Фазовые характеристики и фазовые центры антенн навигационной аппаратуры пользователей спутниковых радионавигационных систем // Радиотехника, 2000, № 5.