

ПРОБЛЕМЫ СПУТНИКОВОЙ НАВИГАЦИИ И ЗОНДИРОВАНИЯ ПОВЕРХНОСТИ ЗЕМЛИ

Г.В. Голубков¹
М.И. Манжелей¹
А.А. Берлин¹
А.Н. Морозов²
Л.В. Эпельбаум³

golubkov@chph.ras.ru
mike.manzheliy@gmail.com
berlin@chph.ras.ru
amor@bmstu.ru
levap@post.tau.ac.il

¹ Институт химической физики им. Н.Н. Семенова РАН,
Москва, Российская Федерация

² МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Российская Федерация

³ Тель-Авивский университет, Тель-Авив, Израиль

Аннотация

Обсуждены основные проблемы спутниковой навигации и дистанционного зондирования поверхности Земли с использованием системы GPS. Эти проблемы обусловлены резонансными квантовыми свойствами среды распространения радиоволн в верхней атмосфере. Проведен критический анализ общепринятых представлений об оптической прозрачности E- и D-слоев для распространения радиоволн, которые используются специалистами при обработке результатов измерений. Предложена принципиально новая схема измерений, ориентированная на то, что источником некогерентного излучения на частоте 1,4 ГГц является атмосферный слой 60...110 км над поверхностью Земли. Рассмотрена проблема калибровки, связанная с текущим состоянием атмосферы

Ключевые слова

Спутниковая навигация, дистанционное зондирование Земли, спутниковая локация, ИК-датчики, калибровка

Поступила в редакцию 09.12.2016

© МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2018

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (грант № 16-05-00052)

Введение. Спонтанные усиления солнечной активности, которые сопровождаются значительным увеличением мощности электромагнитного излучения и выбросом высокоэнергичных частиц, приводят к сильным возмущениям в верхней атмосфере и ионосфере Земли. Одним из наиболее интересных проявлений таких возмущений являются сбои в работе глобальной спутниковой системы позиционирования (GPS), функционирующей в частотном диапазоне 1,2...1,6 ГГц. Повышение солнечной активности приводит к значительному уменьшению отношения сигнал/шум и, как следствие, невозможности декодировки сообщения, содержащегося в сигнале.

Следующим явлением, заслуживающим внимания, является увеличение мощности сигнала, принимаемого приемником GPS, в период повышения солнечной активности. Временные зависимости мощности сигнала GPS и интегрального чис-

ла отказов на приемнике во время геомагнитного возмущения 15 июля 2000 г. были приведены в работе [1] (рис. 1). При этом наблюдалось увеличение интенсивности принимаемого сигнала на приемнике по отношению к мощности сигнала передатчика приблизительно в 3 раза.

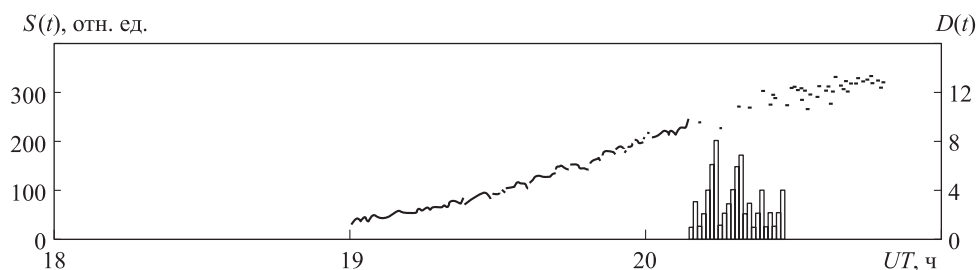


Рис. 1. Зависимость интенсивности принимаемого на приемнике сигнала $S(t)$ и числа отказов $D(t)$ от времени (UT — универсальное время) [1]

Такое поведение сигнала объясняется тем, что он подвержен резонансному воздействию среды распространения, природа которого в последнее время интенсивно исследуется и связана со сдвигом частоты за полосу приема в результате перерасеяния электромагнитных волн на ридберговских частицах в E - и D -слоях атмосферы [2, 3]. Кроме того, дополнительный вклад в полную интенсивность вносит некогерентное СВЧ-излучение ридберговских частиц.

Следовательно, результаты исследований указывают на то, что возмущения солнечной активности являются важным фактором, влияющим на качество позиционирования. В такие периоды погрешности позиционирования могут достигать на поверхности Земли несколько сотен метров, что весьма существенно. В то же время результаты исследований показывают, что для объектов космической инфраструктуры погрешности позиционирования не превышают нескольких метров даже в условиях геомагнитных возмущений [4].

Анализ экспериментальных данных показывает, что основной вклад в погрешность позиционирования формируется на участках радиотрасс, проходящих через нижнюю ионосферу. Оправданность этого вывода подтверждается многочисленными исследованиями. В частности, из результатов, приведенных в работе [5], следует, что в дневное время погрешности позиционирования создаются преимущественно на высотах, меньших 110 км. Влияние нижней ионосферы на качество приема сигнала спутников GPS наглядно продемонстрировано на рис. 2, где представлена усредненная зависимость отношения сигнал/шум (S/N) от времени полета ракеты, запущенной с космодрома Швеции, по баллистической траектории с максимумом на высоте 700 км. Контролируемая часть полета относится к интервалу времени 0...850 с, который закончился на высоте 50 км. Время работы бортовой аппаратуры со спиральной антенной продолжалось 851 с, а остальное время движения, включая стадию спуска, было неконтролируемым. Зависимость, изображенная на рис. 2, соответствует результатам, полученным на спутнике, антенна которого на протяжении всего полета

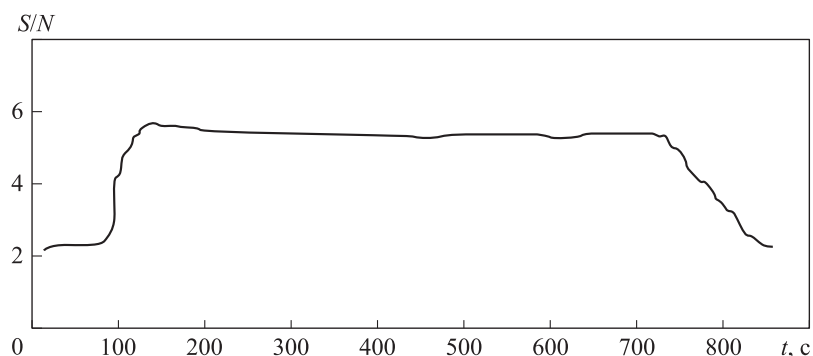


Рис. 2. Зависимость отношения сигнал/шум от времени полета ракеты с момента старта (зависимость построена по данным, приведенным в работе [5])

ориентирована по вертикали. В этих условиях начальные и конечные условия регистрации сигнала *GPS* совпадают. График усредненной зависимости отношения сигнал/шум, принимаемый от этого спутника, имеет вид трапеции. За первые 100 с полета, когда ракета достигла высоты 120 км, значение отношения S/N увеличилось от 2 до 6 дБ. При этом среднее значение 5,5 дБ во время полета практически не изменялось вплоть до высоты над уровнем Земли 100 км на стадии спуска, что соответствует времени 820 с, отсчитанного от момента старта.

В конце полета значение отношения S/N вновь упало до исходного. Таким образом, на высотах 100...700 км значение сигнала мало изменяется, а на меньших высотах происходит его резкое падение. Отношение S/N на уровне Земли до и после старта ракеты остается постоянным и меньше, чем на высотах, превышающих 100 км.

Ридберговскими называются такие высоковозбужденные состояния атомов и молекул, которые расположены вблизи границы ионизации и характеризуются наличием бесконечной последовательности уровней энергии, сходящихся к порогу ионизации. Ридберговские атомы и молекулы обладают одним возбужденным слабосвязанным электроном, состояние которого характеризуется энергией уровня с заданным главным квантовым числом n и угловым моментом электрона l относительно ионного остова. Энергии уровней с большими угловыми моментами не зависят от углового момента l (орбитально вырожденные состояния). Именно эти состояния являются статистически наиболее устойчивыми, поскольку электрон проводит основное время на больших расстояниях от ионного остова. Процесс, приводящий к формированию вырожденных состояний с большими угловыми моментами электрона, называется l -перемешиванием. В верхней атмосфере он протекает быстро и является необратимым.

В настоящей работе приведено описание основных проблем спутниковой навигации и дистанционного зондирования поверхности Земли, которые тесно

связаны друг с другом, и указаны возможные пути их решения. Установлены физические причины искажения спутниковых сигналов и их временной задержки. Показано, что некогерентное СВЧ-излучение неравновесной плазмы в E - и D -слоях атмосферы является единственным источником для пассивной локации, который расположен ниже орбиты спутников. Предложена кардинальная перестройка общей схемы проведения измерений и рассмотрены необходимые технические условия для ее реализации.

Неравновесная двухтемпературная плазма. В периоды сильных геомагнитных возмущений, возникающих после интенсивных вспышек на Солнце, происходит выброс ионосферных электронов, проходящих через E - и D -слои верхней атмосферы Земли. В этих условиях образуется неравновесная двухтемпературная рекомбинационная плазма, в которой за малое время ($\approx 10^{-10}$ с) формируется неравновесное стационарное распределение по энергиям ридберговских частиц среды [6]. Спонтанное излучение происходит значительно раньше, чем устанавливается термодинамическое равновесие. Поскольку концентрация свободных электронов n_e мала по сравнению с концентрацией атмосферных частиц ρ_a , заметного изменения температуры среды T_a не происходит и для ночного и дневного времени в E - и D -слоях она порядка тепловой [7]. Это связано с тем, что высокая поступательная температура частиц, приходящих из F -слоя ионосферы, при входе в более плотную среду расходуется на колебательное и вращательное возбуждение атмосферных молекул. Дальнейшая релаксация возбуждения обусловлена процессами резонансной передачи внутренней энергии, перенос которой происходит путем последующих столкновений. В результате в D -слое происходит отрыв электронной температуры T_e от температуры среды T_a и устанавливается двухтемпературная рекомбинационная плазма с температурой $T_a \ll T_e$, что хорошо согласуется с прямыми измерениями [7].

Для E - и D -слоев концентрация нейтральных частиц среды ρ_a изменяется в интервале $10^{12} \dots 10^{16}$ см⁻³. Концентрация образующихся здесь высоковозбужденных частиц определяется температурой T_e , концентрацией n_e и потоком свободных электронов, а также зависит от плотности среды. Наиболее эффективно в двухтемпературной рекомбинационной плазме заселяются состояния с главными квантовыми числами в диапазоне $n \approx 20-70$ [3]. Концентрация и температура электронов изменяются в зависимости от уровня магнитной бури в пределах $10^3 \leq n_e \leq 10^6$ см⁻³ и $10^3 \leq T_e \leq 3,5 \cdot 10^3$ К (см. работу [8]). Увеличение плотности атмосферы в нижней части D -слоя должно приводить к возрастанию скорости процессов ударного и радиационного тушения ридберговских состояний. Поэтому при $\rho_a \geq 10^{16}$ см⁻³ их концентрация будет резко убывать. Область формирования возбужденных частиц по высоте сосредоточивается в нижней части E -слоя и внутри D -слоя, ближе к его верхней границе (шириной около 25...30 км).

Проблемы дистанционного зондирования поверхности Земли. Дистанционное зондирование может быть активным и пассивным. Пассивное зондирование подразумевает использование естественного излучения для определения свойств поверхности Земли, в то время как в активном зондировании применяются генераторы сигналов. Пассивное зондирование проводится обычно с приемниками, работающими на частоте 1,4 ГГц, поскольку на этой частоте имеется однопараметрическая зависимость мощности сигнала от электронной концентрации.

Основной трудностью, стоящей перед специалистами в области дистанционной спутниковой локации, является отсутствие четкого физического представления об источнике излучения. Ранее полагалось, что источник излучения имеет космическое происхождение. Вместе с тем прямые измерения в обычных условиях показали, что максимальный эффект достигается только в дневное время, когда СВЧ-излучение обусловлено воздействием Солнца [4]. Вследствие удаленности от Земли его с хорошей точностью можно рассматривать как точечный источник. В этом случае принимаемое излучение должно иметь поляризацию. Измерения на спутнике (на орбите с высотой около 800 км) подтвердили это предположение. Однако на Земле поляризация излучения не была обнаружена, т. е. излучение оказалось некогерентным. Кроме того, результаты измерений оказались не только зависящими от времени суток (с заметно изменяющимися в течение дня показаниями), но и существенно зависящими от геомагнитного состояния ионосферы. Это означает, что приемные устройства принципиально не в состоянии обеспечить устойчивость измерений. Кроме того, схемы проводимых измерений были и сейчас ориентированы на прием однократного отражения, исходя из солнечного происхождения источника, т. е. без учета приходящего на спутник излучения из *D*- и *E*-слоев непосредственно. Поскольку излучение Солнца является широкополосным, формирование наблюдаемой на эксперименте «осиной талии» в спектре сверхфонового некогерентного излучения на частоте 1,4 ГГц можно объяснить только наличием дополнительного источника. Следовательно, основным источником излучения с этой частотой должны служить заселяемые днем ридберговские состояния *D*- и *E*-слоев атмосферы, которые ответственны за искажение спутниковых сигналов позиционирования [3]. Поэтому измерения, проводимые в России и за рубежом, нельзя полагать достоверными, т. е. дальнейшее развитие дистанционной спутниковой локации невозможно без детального изучения оптических свойств верхней атмосферы Земли.

Прямые вертикальные измерения падающих и отраженных мощностей потока излучения во времени дают возможность изучать эволюцию *D*- и *E*-слоев атмосферы в различных геофизических условиях. Измерение значения ослабления потока интенсивности некогерентного СВЧ-излучения за счет влияния слоев заряженных аэрозолей и кислотных загрязнений важно для проблем метеорологии. Определение усредненной по времени мощности потока падающего

СВЧ-излучения, в свою очередь, может служить критерием точности восстановления параметров неравновесной двухтемпературной плазмы, при прохождении которой происходит искажение спутниковых сигналов позиционирования. Поскольку эти слои ответственны за некогерентное СВЧ-излучение, одну из возможных схем измерений при пассивной локации можно построить для случая, когда светящийся слой (80...110 км) расположен между спутником и летательным аппаратом (самолетом или дирижаблем). Тогда мощности потоков принимаемого и отраженного излучений задаются простыми выражениями

$$I_{sat}^{(z)} = I_D^{(z)} + I_D^{(z)} (1 - f_w)^2 k_r; \quad (1)$$

$$I_{aer}^{(z)} = I_D^{(z)} (1 - f_w)^2 k_r; \quad (2)$$

$$I_E^{(z\downarrow)} = I_D^{(z)} (1 - f_w); \quad (3)$$

$$I_E^{(z\uparrow)} = I_D^{(z)} (1 - f_w) k_r, \quad (4)$$

где $I_{sat}^{(z)}$, $I_{aer}^{(z)}$, $I_E^{(z\downarrow)}$, $I_E^{(z\uparrow)}$ — мощности принимаемого на спутнике (включающего в себя прямое излучение от D -слоя и отраженного от Земли), отраженного на самолете, падающего на поверхность и отраженного излучений; $I_D^{(z)}$ — усредненная по времени мощность потока падающего СВЧ-излучения от D -слоя; f_w — фактор уменьшения потока интенсивности некогерентного СВЧ-излучения за счет влияния слоев заряженных аэрозолей; k_r — коэффициент отражения, определяемый как $k_r = I_E^{(z\uparrow)} / I_E^{(z\downarrow)}$. Учитывая (1)–(4), нетрудно получить следующие соотношения:

$$I_D^{(z)} = \frac{\Delta \sqrt{k_r (\eta - 1)}}{1 - k_r}; \quad (5)$$

$$f_w = 1 - \frac{1}{\sqrt{k_r (\eta - 1)}}, \quad (6)$$

где η , Δ — параметры, $\eta = I_{sat}^{(z)} / I_{aer}^{(z)}$, $\Delta = I_E^{(z\downarrow)} - I_E^{(z\uparrow)}$.

Достоинством соотношений (5) и (6) является то, что они выражаются через относительные величины. Как было отмечено выше, прямые вертикальные измерения падающих и отраженных мощностей потока излучения (1)–(4) во времени позволяют изучать эволюцию состояния D - и E -слоев атмосферы в различных геофизических условиях. Наглядной демонстрацией зависимости параметров плазмы этих слоев от времени служит опыт Аффраймовича [1]. Изменение величины $f_w(t)$, определяемой по выражению (6), важно непосредственно для проблем метеорологии. В свою очередь, соотношения (1), (2) и (5) дают возможность однозначно находить величину $I_D^{(z)} = I_{sat}^{(z)} - I_{aer}^{(z)}$ и, соответ-

ственно, могут служить критерием точности восстановления параметров неравновесной двухтемпературной плазмы *D*- и *E*-слоев атмосферы в различных геофизических условиях.

Проблема калибровки дистанционной пассивной локации. Следующей фундаментальной научно-технической проблемой является калибровка измерительной аппаратуры (установленной на спутнике или летательном аппарате), позволяющая однозначно связать показатели датчиков с определяемыми физическими параметрами (влажности, структуры и химического состава, магнитных свойств отражающей поверхности и т. д.). Причем в отличие от прямых наземных измерений спутники принимают одновременно как отраженное от поверхности Земли излучение, так и излучение верхней атмосферы. Следовательно, калибровка измерительной аппаратуры и восстановление физических параметров поверхности должны осуществляться на основе детального анализа взаимодействий исходного излучения со средой распространения и с поверхностью Земли.

Традиционный метод спутниковой калибровки называется косвенным (*vicarious*) и заключается в следующем. Необходимые соотношения между выходными сигналами датчиков и искомыми физическими величинами находятся путем прямого сравнения измеряемых сигналов с абсолютным стандартом этих величин до запуска спутника, т. е. калибровка проводится непосредственно на Земле [9]. Обычно здесь используется спектральное окно с центральной частотой 1,413 ГГц и шириной полосы 27 МГц, которое соответствует космическому излучению за счет нижнего запрещенного перехода в атоме водорода. При этом полагается, что влияние эффекта Фарадея на результаты измерений оказывается незначительным [10]. Принципиальный недостаток такой калибровки — полное игнорирование вариаций параметров датчиков во времени, обусловленных наличием некогерентного свехфонового излучения *D*- и *E*-слоев ионосферы в широком диапазоне частот. Необходимо также учитывать влияние рассмотренных выше эффектов ослабления интенсивности излучения за счет неоднородностей нижней атмосферы. Для выхода из сложившейся ситуации следует перейти к двухчастотному методу измерений и воспользоваться тем обстоятельством, что на частоте 1,4 ГГц интенсивность СВЧ-излучения пропорциональна квадрату концентрации свободных электронов, а на частоте 5 ГГц — ее первой степени [8].

Решение проблемы калибровки измерительной аппаратуры невозможно без мониторинга параметров двухтемпературной плазмы в *E*- и *D*-слоях атмосферы. В связи с этим следующим важным направлением исследований является детальное изучение особенностей спектра ИК-излучения (где основной вклад вносят радиационные переходы $\Delta n \geq 1$), которое напрямую связано с рассмотренным выше некогерентным СВЧ-излучением. Поскольку форма линии излучения ридберговских состояний весьма критична к распределению концентрации и температуры электронов внутри этих слоев, измерение ИК-спектра на

спутнике может служить основой для решения обратной задачи о восстановлении зависимости основных параметров плазмы и их распределения по высоте от времени. Достоверная информация о форме ИК-спектра также позволит рассчитывать с помощью программы «Ридберг» зависящие от высоты заселенности ридберговских состояний.

Определение параметров неравновесной плазмы по спектру ИК-излучения. Наиболее перспективный метод мониторинга параметров плазмы *D*- и *E*-слоев атмосферы во времени — их восстановление с помощью решения обратной задачи по спектру длинноволнового ИК-излучения (в диапазоне длин волн 15...100 мкм), измеряемого на низкоорбитальном спутнике [8]. Это накладывает определенные ограничения на ИК-датчики, которые наряду с высокой разрешающей способностью должны обладать небольшими размерами и массой. Датчик, используемый в работе [11], таким разрешением не обладал. Выход из этой ситуации возник в последние годы и связан с появлением метаматериалов, обладающих уникальными оптическими свойствами, которые связаны с аномальным отражением и преломлением [12, 13], что стимулировало разработку принципиально новых ИК-датчиков (рис. 3), где фильтры представляют собой метаповерхности [13]. Схема разработана исходя из требования быстрого действия измерительного прибора.

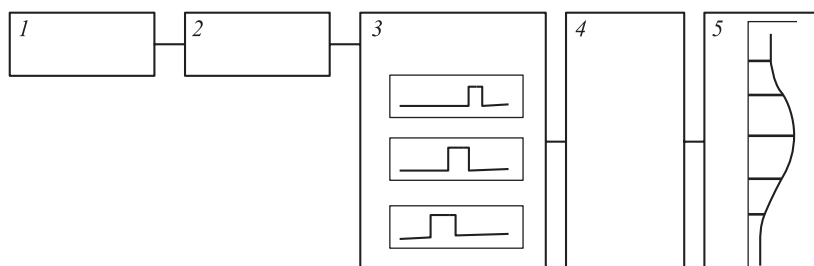


Рис. 3. Блок-схема датчика для измерения спектра некогерентного ИК-излучения:
1 — широкополосная ИК-антенна; 2 — разветвитель; 3 — система фильтров; 4 — детекторы;
5 — спектр сигнала на выходе

В настоящее время Япония и США активно участвуют в создании этих приборов. Так, по программе *GRES* Агентства по науке и технологиям Японии уже реализованы новейшие однофотонные детекторы в диапазоне длин волн 10...50 мкм, которые являются зарядочувствительными транзисторами GaAs/AlGaAs с эквивалентным уровнем шума $8,3 \cdot 10^{-19}$ В/Гц^{1/2} [14]. Следующую модификацию (с длиной волн до 100 мкм) разрабатывают в Массачусетском университете США по программе *CLAREO* с учетом требований его надежной работы в тепловых и криогенных условиях и устойчивости к вибрациям при выводе спутника на орбиту [15].

Заключение. При проведении пассивной локации Земли необходимо иметь методику калибровки измерительного оборудования, которая вплоть до настоящего времени в мировой практике отсутствует. Попытки обойти эту проблему с помощью дифференциального метода измерения (используя одновременно две

антенны, расположенные вверх и вниз) не привели к успеху вследствие специфики некогерентного СВЧ-излучения, которая обусловлена тем, что источник излучения не является точечным и пространственно широко распределен в верхней атмосфере. Следующий мешающий фактор — несовпадение площадей обзора используемых антенн. Для проведения калибровки измерительного оборудования и независимых от времени измерений необходимо в каждый момент времени знать мощность потока излучения, приходящего на поверхность, на частотах 1,4 и 5 ГГц. Поскольку источником этого излучения являются ридберговские частицы, знание функции распределения их концентрации в излучающем слое (80...110 км) позволит определить мощность приходящего потока I_{tot} в реальном времени. Эти частицы излучают одновременно в длинноволновом ИК-диапазоне, в связи с чем распределение их концентрации наиболее целесообразно восстанавливать с помощью измеряемого на спутниках ИК-спектра в диапазоне длин волн 20...100 мкм, что дополнительно потребует сложной математической обработки сигналов [16, 17]. Кроме того, датчики в указанном диапазоне должны быть виброустойчивыми и работать в широком диапазоне значений температуры (от нормальных до криогенных), что является достаточно сложной научно-технической задачей, которую необходимо решать в самое ближайшее время.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Mid-latitude* amplitude scintillations of GPS signals and GPS failures at the auroral oval boundary / E.L. Afraimovich, E.I. Astafeva, O.I. Bergardt, et.al. // *Radiophysics and Quantum Electronics*. 2004. Vol. 47. Iss. 7. P. 453–468.
DOI: 10.1023/B:RAQE.0000047237.67771.bc
2. Голубков Г.В., Голубков М.Г., Манжелий М.И. Микроволновое излучение верхней атмосферы Земли в периоды сильных геомагнитных возмущений // *Хим. физика*. 2012. Т. 31. № 2. С. 31–47.
3. Голубков Г.В., Голубков М.Г., Манжелий М.И. Микроволновое излучение верхней атмосферы Земли в период повышения солнечной активности // *ДАН*. 2012. Т. 447. № 5. С. 503–506.
4. Ashby N. Relativity and the global positioning system // *Physics Today*. 2002. Vol. 55. Iss. 5. P. 41–47. DOI: 10.1063/1.1485583
5. Montenbruck O., Markgraf M. Maxus-4 Orion GPS tracking system flight report. MAX4-DLR-RP-0001; DLR/GSOC, Oberpfaffenhofen, 2001.
6. Jacobsen K.S., Pedersen A., Moen J.I., Bekkeng T.A. A new Langmuir probe concept for rapid sampling of space plasma electron density // *Measurement Science and Technology*. 2010. Vol. 21. No. 8. P. 085902. DOI: 10.1088/0957-0233/21/8/085902
7. Sharma D.K., Sharma P.K., Rai J., Garg S.C. Effect of solar activity on ionospheric temperatures in F2 region // *Indian J. Radio Space Phys.* 2008. Vol. 37. P. 319–325.
8. Golubkov G.V., Golubkov M.G., Manzhelii M.I., Karpov I.V. Optical quantum properties of GPS signal propagation medium — D layer // *The atmosphere and ionosphere. Elementary processes, monitoring, and ball lightning*. New York: Springer, 2014. P. 1–68.
DOI: 10.1007/978-3-319-05239-7

9. Müller R. Calibration and verification of remote sensing instruments and observations // Remote Sensing. 2014. Vol. 6. Iss. 6. P. 5692–5695. DOI: 10.3390/rs6065692
10. Le Vine D., Abraham S. Microwave radiometry and remote sensing of the Earth's surface and atmosphere. Boston–Köln: VSP, 2000. P. 89–96.
11. First light from the far-infrared spectroscopy of the troposphere (FIRST) instrument / M.G. Mlynczak, D.G. Johnson, H. Latvakovski, et al. // Geophys. Res. Lett. 2006. Vol. 33. Iss. 7. P. L07704. DOI: 10.1029/2005GL025114
12. Cai W., Shalaev V. Optical metamaterials. Fundamentals and applications. New York–Dordrecht–Heidelberg–London: Springer, 2009. 200 p.
13. Light propagation with phase discontinuities: Generalized laws of reflection and refraction / N. Yu, P. Genevet, M.A. Kats, et al. // Science. 2011. Vol. 334. Iss. 6054. P. 333–337. DOI: 10.1126/science.1210713
14. Ueda T., Komiyama S. Novel ultra-sensitive detectors in the 10–50 μm wavelength range // Sensors. 2010. Vol. 10. Iss. 9. P. 8411–8423. DOI: 10.3390/s100908411
15. Cataldo G., Hoffman J.A. Development of ultracompact high-sensitivity, space-based instrumentation for far-infrared and submillimeter astronomy. Massachusetts: MIT, 2015. 115 p.
16. Eppelbaum L., Alperovich L., Zheludev V., Pechersky A. Application of informational and wavelet approaches for integrated processing of geophysical data in complex environments // Proc. the 2011 SAGEEP Conf. Environment and Engineering Geophysical Society, 2011. P. 461–497.
17. A new combined wavelet methodology: Applied to GPR and ERT data in the Montagnole experiment (French Alps) / L. Alperovich, L. Eppelbaum, V. Zheludev, et al. // Journal of Geophysics and Engineering. 2011. Vol. 10. No. 2. P. 1–17. DOI: 10.1088/1742-2132/10/2/025017

Голубков Геннадий Валентинович — д-р физ.-мат. наук, профессор, ведущий научный сотрудник Института химической физики им. Н.Н. Семенова РАН (Российская Федерация, 119991, Москва, ул. Косыгина, д. 4).

Манжелей Михаил Иванович — инженер-исследователь Института химической физики им. Н.Н. Семенова РАН (Российская Федерация, 119991, Москва, ул. Косыгина, д. 4).

Берлин Александр Александрович — академик Российской академии наук, д-р хим. наук, профессор, директор Института химической физики им. Н.Н. Семенова РАН (Российская Федерация, 119991, Москва, ул. Косыгина, д. 4).

Морозов Андрей Николаевич — д-р физ.-мат. наук, профессор, заведующий кафедрой «Физика», генеральный директор Центра прикладной физики МГТУ им. Н.Э. Баумана (Российская Федерация, 105005, Москва, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1).

Эппельбаум Лев Виленович — доктор геофизики, профессор отделения геофизики Тель-Авивского университета (Израиль, 69978, Тель-Авив, п/я 39040).

Просьба сослаться на эту статью следующим образом:

Проблемы спутниковой навигации и зондирования поверхности Земли / Г.В. Голубков, М.И. Манжелей, А.А. Берлин, А.Н. Морозов, Л.В. Эппельбаум // Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Естественные науки. 2018. № 1. С. 61–73.
DOI: 10.18698/1812-3368-2018-1-61-73

PROBLEMS OF SATELLITE NAVIGATION AND REMOTE SENSING OF EARTH'S SURFACE

G.V. Golubkov¹

M.I. Manzheliy¹

A.A. Berlin¹

A.N. Morozov²

L.V. Eppelbaum³

golubkov@chph.ras.ru

mike.manzheliy@gmail.com

berlin@chph.ras.ru

amor@bmstu.ru

levap@post.tau.ac.il

¹ **Semenov Institute of Chemical Physics, Russian Academy of Sciences,
Moscow, Russian Federation**

² **Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russian Federation**

³ **Tel Aviv University, Tel Aviv, Israel**

Abstract

The purpose of the article is to consider the main problems of satellite navigation and remote sensing of the Earth's surface using the GPS system, which is caused by the resonant quantum properties of the radio wave propagation medium in the upper atmosphere. We carried out a critical analysis of the generally accepted ideas on the optical transparency of the E and D layers for the propagation of radio waves, which are used by specialists in processing the measurement results. As a result, we proposed a fundamentally new measurement scheme which targets the atmospheric layer 60...110 km above the Earth's surface being the source of incoherent radiation at a frequency of 1.4 GHz. Finally, we discussed the calibration problem associated with the current state of the atmosphere

Keywords

*Satellite navigation, remote sensing
of the Earth, satellite location,
IR-sensors, calibration*

Received 09.12.2016

© BMSTU, 2018

*The work was carried out with the state financial support of the Russian Foundation for
Basic Research (grant no. 16-05-00052)*

REFERENCES

- [1] Afraimovich E.L., Astafeva E.I., Bergardt O.I., Dem'yanov V.V., Kondakova T.N., Lesyuta O.S., Shpynev B.G. Mid-latitude amplitude scintillations of GPS signals and GPS failures at the auroral oval boundary. *Radiophysics and Quantum Electronics*, 2004, vol. 47, iss. 7, pp. 453–468. DOI: 10.1023/B:RAQE.0000047237.67771.bc
- [2] Golubkov G.V., Golubkov M.G., Manzhelii M.I. Microwave radiation in the upper atmosphere of the Earth during strong geomagnetic disturbances. *Russian Journal of Physical Chemistry B*, 2012, vol. 6, iss. 1, pp. 112–127. DOI: 10.1134/S1990793112010186
- [3] Golubkov G.V., Golubkov M.G., Manzhelii M.I. Microwave and IR radiation of the upper atmosphere during periods of enhanced solar activity. *Doklady Physics*, 2012, vol. 57, iss. 12, pp. 461–464. DOI: 10.1134/S102833581212004X
- [4] Ashby N. Relativity and the global positioning system. *Physics Today*, 2002, vol. 55, iss. 5, pp. 41–47. DOI: 10.1063/1.1485583

- [5] Montenbruck O., Markgraf M. Maxus-4 Orion GPS tracking system flight report. MAX4-DLR-RP-0001; DLR/GSOC, Oberpfaffenhofen, 2001.
- [6] Jacobsen K.S., Pedersen A., Moen J.I., Bekkeng T.A. A new Langmuir probe concept for rapid sampling of space plasma electron density. *Measurement Science and Technology*, 2010, vol. 21, no. 8, pp. 085902. DOI: 10.1088/0957-0233/21/8/085902
- [7] Sharma D.K., Sharma P.K., Rai J., Garg S.C. Effect of solar activity on ionospheric temperatures in F2 region. *Indian J. Radio Space Phys.*, 2008, vol. 37, pp. 319–325.
- [8] Golubkov G.V., Golubkov M.G., Manzhelii M.I., Karpov I.V. Optical quantum properties of GPS signal propagation medium — D layer. In: *The atmosphere and ionosphere. Elementary processes, monitoring, and ball lightning*. New York, Springer, 2014, pp. 1–68. DOI: 10.1007/978-3-319-05239-7
- [9] Müller R. Calibration and verification of remote sensing instruments and observations. *Remote Sensing*, 2014, vol. 6, iss. 6, pp. 5692–5695. DOI: 10.3390/rs6065692
- [10] Le Vine D., Abraham S. Microwave radiometry and remote sensing of the Earth's surface and atmosphere. Boston, Köln, VSP, 2000, pp. 89–96.
- [11] Mlynczak M.G., Johnson D.G., Latvakovski H., et al. First light from the far-infrared spectroscopy of the troposphere (FIRST) instrument. *Geophys. Res. Lett.*, 2006, vol. 33, iss. 7, pp. L07704. DOI: 10.1029/2005GL025114
- [12] Cai W., Shalaev V. Optical metamaterials. Fundamentals and applications. New York, Dordrecht, Heidelberg, London, Springer, 2009. 200 p.
- [13] Yu N., Genevet P., Kats M.A., et al. Light propagation with phase discontinuities: Generalized laws of reflection and refraction. *Science*, 2011, vol. 334, iss. 6054, pp. 333–337. DOI: 10.1126/science.1210713
- [14] Ueda T., Komiyama S. Novel ultra-sensitive detectors in the 10–50 μm wavelength range. *Sensors*, 2010, vol. 10, iss. 9, pp. 8411–8423. DOI: 10.3390/s100908411
- [15] Cataldo G., Hoffman J.A. Development of ultracompact high-sensitivity, space-based instrumentation for far-infrared and submillimeter astronomy. Massachusetts, MIT, 2015. 115 p.
- [16] Eppelbaum L., Alperovich L., Zheludev V., Pechersky A. Application of informational and wavelet approaches for integrated processing of geophysical data in complex environments. *Proc. the 2011 SAGEEP Conf. Environment and Engineering Geophysical Society*, 2011, pp. 461–497.
- [17] Alperovich L., Eppelbaum L., Zheludev V., Dumoulin J., Soldovieri F., Proto M., Bavusi M., Loperte A. A new combined wavelet methodology: Applied to GPR and ERT data in the Montagnole experiment (French Alps). *Journal of Geophysics and Engineering*, 2011, vol. 10, no. 2, pp. 1–17. DOI: 10.1088/1742-2132/10/2/025017

Golubkov G.V. — Dr. Sc. (Phys.-Math.), Professor, Leading Research Scientist, Semenov Institute of Chemical Physics, Russian Academy of Sciences (Kosygina ul. 4, Moscow, 119991 Russian Federation).

Manzhelii M.I. — Research Engineer, Semenov Institute of Chemical Physics, Russian Academy of Sciences (Kosygina ul. 4, Moscow, 119991 Russian Federation).

Berlin A.A. — Academician of the Russian Academy of Sciences, Dr. Sc. (Chem.), Professor, Head of Semenov Institute of Chemical Physics, Russian Academy of Sciences (Kosygina ul. 4, Moscow, 119991 Russian Federation).

Morozov A.N. — Dr. Sc. (Phys.-Math.), Professor, Head of Physics Department, Director General of the Center for Applied Physics, Bauman Moscow State Technical University (2-ya Baumanskaya ul. 5, str. 1, Moscow, 105005 Russian Federation).

Eppelbaum L.V. — Dr. Sc. (Geophys.), Professor, Department of Geophysics, Tel Aviv University (P.O. Box 39040, Tel Aviv, 69978 Israel).

Please cite this article in English as:

Golubkov G.V., Manzheliy M.I., Berlin A.A., Morozov A.N., Eppelbaum L.V. Problems of Satellite Navigation and Remote Sensing of Earth's Surface. *Vestn. Mosk. Gos. Tekh. Univ. im. N.E. Baumana, Estestv. Nauki* [Herald of the Bauman Moscow State Tech. Univ., Nat. Sci.], 2018, no. 1, pp. 61–73 (in Russ.). DOI: 10.18698/1812-3368-2018-1-61-73



В Издательстве МГТУ им. Н.Э. Баумана
вышло в свет учебное пособие авторов

С.А. Харитонов, А.А. Ципилев

«Динамика механических систем»

Рассмотрены вопросы исследования колебаний в механических системах. Представлены методики определения параметров движения колебательных систем с одной степенью свободы, с конечным числом степеней свободы, а также систем с распределенными параметрами. Уделено внимание вопросам устойчивости колебательных процессов механических систем, приведены критерии устойчивости, рассмотрены типовые схемы нагружения узлов и конструкций транспортных машин. Изложены методы исследования вибрационных воздействий и способы борьбы с вибрациями. Даны рекомендации по конструированию виброзащитных механизмов.

По вопросам приобретения обращайтесь:

105005, Москва, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1
+7 (499) 263-60-45
press@bmstu.ru
www.baumanpress.ru