



Достижения в области космических исследований
Advances in Space Research 46 (2010) 111–117

Авторы:

Shuanggen Jin

Attila Komjathy

Центр космических исследований, Техасский университет в Остине, США.

Перевод выполнила:

Горбунова М.А.

Инженер по технической поддержке НПК GPScom

Рефлектометрия ГНСС и дистанционное зондирование: Новые цели и результаты.

Краткий обзор

Глобальная навигационная спутниковая система (ГНСС) сыграла важную роль в решении многих научных вопросов, связанных с точным позиционированием на поверхности Земли, особенно в качестве сложившейся технологии в геодезии и науках о Земле. С развитием ГНСС, как спутниковой технологии, работающей в микроволновом диапазоне (СВЧ), стали рассматриваться и использоваться новые возможности и способы их широкого применения. Универсальные и доступные сигналы ГНСС представляются как новый, высокоточный, непрерывный, всепогодный инструмент дистанционного зондирования поверхности Земли, работающий с пренебрежимо малой задержкой. Преломленные сигналы спутников ГНСС в радиодиапазоне, совместно с наземными наблюдениями ГНСС, могут определять наличие тропосферных водных паров, температуру и давление, параметры тропопаузы и ионосферное электронное содержание, а так же профиль электронной плотности. Отраженные от поверхности океана и суши сигналы ГНСС могут определять уровень поверхности океана, скорость и направление ветра над океаном, влажность почвы, толщину льда и снега. В данной работе представлены возможности применения дистанционного зондирования в атмосфере, океанах, на земле и в гидрологии, а так же затронуты новые задачи и результаты работы.

1. Введение.

Глобальная навигационная спутниковая система (ГНСС), включающая Глобальную Систему Позиционирования (GPS) в Соединенных Штатах Америки, русскую систему ГЛОНАСС, европейскую Галилео и китайскую КОМПАСС, может быть характеризована как высокоточный, непрерывный, всепогодный инструмент, работающий в микроволновом диапазоне, с пренебрежимо малой

НПК Джи Пи Эс Ком. 109387, Россия, г. Москва, ул. Люблинская, д.42, офис 509

Тел.: (495) 232 2870 Факс: (495) 232 2870 www.gpscom.ru

Email: info@gpscom.ru

задержкой, с сигналами, проходящими сквозь земную атмосферу. Эти характеристики хорошо выражают применение и возможности ГНСС. Когда сигнал GPS проходит через атмосферу Земли, на него действует эффект преломления, что приводит к удлинению геометрического пути луча. В 1992 году, когда GPS стал работать в полном объеме, Вэр предложил использовать задержку GPS сигналов для зондирования атмосферы Земли. Третьего апреля 1995 года небольшой исследовательский спутник Microlab-1 был удачно введен на околоземную орбиту, для проверки покрытия радиометода GPS (Feng и Herman, 1999). С тех пор GPS/Метеорологическая Миссия (GPS/MET) использования техники радиопокрытия применялась для обеспечения точности, всепогодности, обобщения показателей преломления, давления, профилей плотности в тропосфере, температуры в нижней стратосфере (35 - 40 км) и ионосферного полного электронного содержания (ТЕС), а также профилей электронной плотности для улучшения качества анализа и прогноза погоды, мониторинга изменений климата и отслеживания ионосферных процессов.

Помеха типа "повторное изображение" является одним из основных источников ошибок для навигации и позиционирования. Однако, недавно было признано, что особый вид мультизадержки сигнала ГНСС, отраженного от поверхности Земли, может быть использован для зондирования земной поверхности. Холл и Корди (1988) впервые применили радар с разнесенными антеннами, как океанический радиолокационный рефлектометр, используя сигнал в микроволновом диапазоне, передаваемый по GPS, предложенный Европейским космическим агентством (ЕКА). Рубашкин (1993) продемонстрировал концепцию радиолокационного зондирования поверхности океана с помощью двух спутников, поместив радиопередатчик на околоземной орбите и приемник на геостационарной орбите. Мартин-Нейра (1996) предложил и описал альтиметрические системы для измерения уровня морской поверхности. Кацберг и Гаррисон (1996) предложили использовать отражение сигнала GPS от океана для ионосферных измерений, добавив приемник GPS и направленные вниз антенны к каждому спутнику, и оценили технические возможности и эффективность. Позже был опробован и применен ряд экспериментов и операций с использованием отраженных от поверхностей океана и земли сигналов GPS, для определения уровня поверхности океана, скорости и направления ветра над поверхностью океана, влажности почвы, толщины снега и льда.

Таким образом, универсальность и доступность отражения и преломления сигналов ГНСС привела к появлению новых методов. Эти сигналы безопасны и могут использоваться даже для дистанционного зондирования в природоохранных зонах. Данная статья рассматривает новые цели и результаты дистанционного зондирования атмосферы, океанов, земли и гидрологии, а так же новые возможности для будущих задач.

2. Атмосферное дистанционное зондирование с использованием ГНСС

Из-за атмосферной рефракции сигналы GPS распространяются через атмосферу Земли вдоль слегка изогнутой траектории и с небольшой задержкой в скорости (рис 1а). Долгое время задержки сигналов ГНСС в тропосфере и ионосфере считались помехой, источником ошибки, а сейчас они используются для определения полезных параметров атмосферы, в том числе тропосферного водяного пара, температуры и давления, общего электронного содержания ионосферы и профиля электронной плотности. В настоящее время ряд миссий радиопокрытия был успешно запущен для изучения атмосферы и ионосферы, а также для исследований, связанных с изменениями климата, таких как SAC-C (Великобритания и Аргентина), германский CHAMP (CHALLENGING Minisatellite Payload), GRACE (Gravity Recovery and Climate Experiment) (Великобритания и Германия), FORMOSAT-3/COSMIC (FORMOSA SATellite mission - 3/Constellation Observing System for Meteorology, Ionosphere and Climate) (Тайвань и Великобритания), немецкие спутники TerraSAR-X и европейские MetOp. Эти спутники, совместно с наземными наблюдениями GPS, компенсируют тропосферный водяной пар, давление, температуру, параметры тропопаузы, общее электронное содержание ионосферы и профиль электронной плотности, которые сопровождали традиционные инструментальные

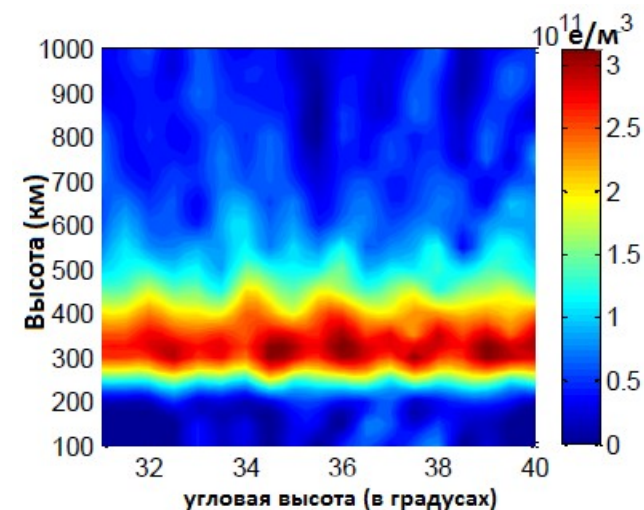


Рис 2. Профиль электронной плотности ионосферы, измеренный наземными станциями GPS в Южной Корее 28 октября 2003 в 13:00 (UT)

наблюдения, и влияли на точность.

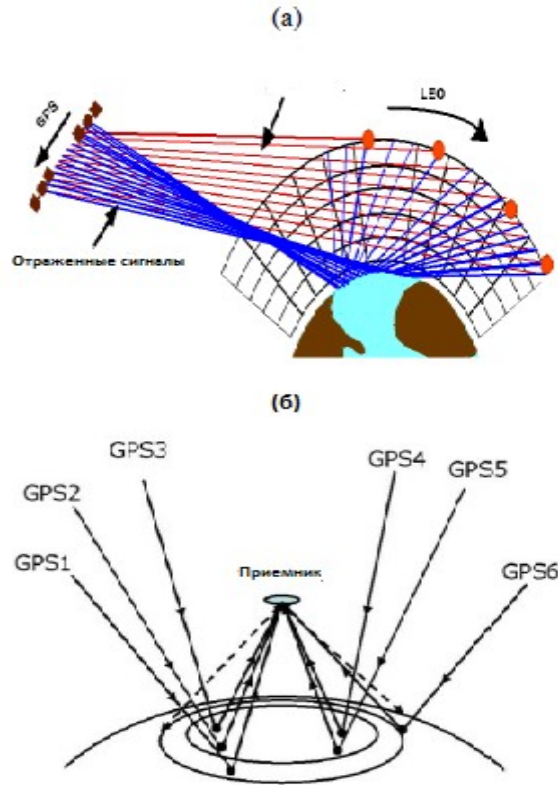


Рис.1. Преломленные и отраженные сигналы ГНСС

наблюдения, и влияли на точность. Эти спутники, совместно с наземными наблюдениями GPS, компенсируют тропосферный водяной пар, давление, температуру, параметры тропопаузы, общее электронное содержание ионосферы и профиль электронной плотности, которые сопровождали традиционные инструментальные

Например, на рисунке 2 показаны профили электронной плотности ионосферы из реконструкции наземной GPS-томографии над Южной Кореей 28 октября 2003 в 13:00 (UT).

Эти наземные и космические GPS наблюдения могут дать важную информацию о профиле ионосферы в 3D, связанную с активностью и состоянием ионосферы, в частности для изучения солнечных вспышек и геомагнитных бурь.

Традиционные инструменты для наблюдения атмосферы, такие как радиометр водяного пара (РВП), ионозонд, радар некогерентного рассеивания (РНС), бортовая ионосферная станция, расположенная на ракете, и спутниковые наблюдения (Например, метеорологический лазерный локатор ИК-диапазона и инфракрасные исследовательские исследования (Калипсо)), являются дорогостоящими, а также частично ограниченными как в нижней ионосфере, так и в нижней части верхней ионосферы.

Спутники GPS, расположенные на высоких орбитах (~20.200 км), способны обеспечить подробную информацию о структуре всей ионосферы, даже о плазмосфере. Таким образом, GPS широко применяется в зондировании атмосферы, метеорологии, климатологии и исследовании космической погоды. Кроме того, GPS может контролировать ионосферные возмущения во время землетрясений и извержений вулканов, возникающие из-за связи твердого тела Земли и ионосферы, как например при землетрясении в уезде Вэньчуань провинции Сычуань в Китае в 2008 году (Джин и соавт. 2010), которые могут помочь взглянуть на активность Земли по-новому.

3. Океаническое дистанционное зондирование

GPS спутники постоянно посылают радиосигналы на Землю. Однако, часть сигналов отражается от поверхности Земли (рис. 1б). Задержки отраженного сигнала GPS от неровной поверхности могут представлять информацию о дифференциальных путях между прямым и отраженным сигналами. Вместе с информацией о положении антенны приемника и среды, задержка, связанная с измерениями свойств отражающей поверхности, может быть использована для определения характеристик поверхности. Например, получив GPS измерения, по отраженным сигналам от поверхности океана можно узнать высоту поверхности океана, скорость и направление ветра, и даже характеристики морского льда.

3.1 Определение высоты поверхности океана

Обычное единичное радиолокационное зондирование океанов требует наличие специального передатчика и приемника, оснащенных большими антеннами для достижения высокой разрешающей способности, в то время как двухпозиционной радиолокационной системе GPS требуется только приемник. С ее помощью можно получать непрерывные, всепогодные сигналы глобального покрытия во времени, близком к реальному. Хотя спутниковая техника для зондирования морской поверхности работает с высоким пространственным разрешением при съемке земной поверхности, снимок охватывает довольно

НПК Джи Пи Эс Ком. 109387, Россия, г. Москва, ул. Люблинская, д.42, офис 509

Тел.: (495) 232 2870 Факс: (495) 232 232 2870 www.gpscom.ru

Email: info@gpscom.ru

большие территории (например, порядка 300 км для TOPEX / Poseidon). Кроме того, при 10-дневном обращении спутника (TOPEX / Poseidon) частота съемки слишком мала для мониторинга земной поверхности. В новых широкополосных альтиметрах улучшен пространственный охват, но частота обращения по-прежнему составляет 10 дней. В то же время по отраженным от поверхности океана сигналам GPS можно измерить высоту поверхности океана с высоким пространственным разрешением и достаточной частотой. Результаты измерений высоты морской поверхности, выполненные с помощью GPS, показали хорошую согласованность (порядка 2 см) с независимыми измерениями TOPEX/Poseidon. Таким образом, использование отраженных от поверхности океана GPS-сигналов могло бы компенсировать недостатки применяемых методов, таких как радиолокационная альтиметрия.

3.2 Мониторинг ветров на поверхности океана

GPS технику в двухпозиционной радиолокационной конфигурации можно использовать для измерения параметров направлений ветров на поверхности океана. Ключевой вопрос состоит в извлечении информации из отраженных сигналов GPS. Основой измерений являются отраженные GPS-сигналы, принятые для определения различных задержек. Размер и форма блестящей зоны океана зависят от параметров поверхности. Измеряются задержки псевдослучайной последовательности по отношению к непосредственно полученным сигналам, отраженным от поверхности, находящейся в непосредственной видимости. Форма задержанного сигнала зависит от состояния поверхности океана, которая связана со скоростью и направлением ветра. Таким образом, по отраженным GPS-сигналам можно измерить скорость и направление ветра на поверхности океана.

Используя карту приема задержек сигнала L1 с частотой 1575.42 Гц, ученые исследовательского центра НАСА успешно оценили скорость и направление ветра на поверхности океана. Скорость ветра, вычисленная с использованием данных GPS, согласуется с независимыми измерениями скорости ветра, полученными методом TOPEX/Poseidon и с данными зонда с точностью 2м/с. По оценкам, направление ветра совпадает с результатами, полученными с морских буев. Кроме того, измерение скорости ветра на поверхности океана при помощи GPS соответствовало измерениям и другими независимыми методами, такими как радиолокационные рефлектометры, эшелоны полета, микроволновые радиометры и сбрасываемые радиозонды. Кроме того, отраженные сигналы GPS, принятые созвездием для мониторинга стихийных бедствий (DMC) на низкой околоземной орбите Соединенного Королевства, также показали успешные результаты в области дистанционного зондирования океана при низких скоростях ветра и ограниченной точности.

3.3 Зондирование состояния льдов на море

Из-за сложных и меняющихся условий морского льда, таких как недоступность и плохие погодные условия, трудно контролировать состояние морского льда, применяя обычные способы. Поэтому измерения параметров морского льда производятся спутниковыми методами. Тем не менее, ни один датчик не способен обеспечить необходимый диапазон наблюдений. Например, полученные синтезированной апертурой (SAR) изображения имеют разрешение, достаточное для исследования подробных характеристик льда, но частота съемки у существующих спутников мала по сравнению и изменением ледников, хотя эта проблема может быть решена применением новых спутников. Кроме того, стоимость приобретения и обработки изображений RСА довольно высока. Также космические доплеровские датчики смогут обеспечивать более густое покрытие с использованием нескольких длин волн, но они имеют значительно более низкое разрешение. В то же время, оптические и тепловые датчики обладают и довольно хорошим разрешением и временной дискретизацией, но они ограничены условиями видимости.

Рефлектометрия GPS может использоваться как новая техника для изучения состояния морского льда. Комьяти проанализировал отражение GPS-сигнала от морского льда в Арктике и у Бэрроу, Аляска, США. Корреляция между сигналами обратного рассеяния RADARSAT и GPS показывают, что отраженные сигналы GPS могут дать полезную информацию о состоянии морского льда. Форма отраженного сигнала подходила для приемников GPS, находящихся на умеренных высотах, и его пиковая мощность значительно изменялась вдоль трассы полета. Такое поведение отраженного сигнала ясно показывает его чувствительность к состоянию льда и говорит о том, что отраженный сигнал GPS может быть использован для определения характеристик льда. Кроме того, диэлектрическая проницаемость льда зависит от различных факторов, таких как состав льда, плотность, возраст, происхождение, соленость, температура, морфология. Внутреннее состояние льда может быть определено по коэффициенту отражения от замерзшей поверхности моря, эффективной диэлектрической проницаемости льда и воды при определенных условиях. В будущем, отраженные сигналы GPS смогут предоставить более подробную информацию о внутреннем состоянии морского льда, в том числе о льдинных хребтах, замороженных цветах, битом льде, мелкомасштабных неровностях на снежно-ледяном покрове. Таким образом, отраженный сигнал GPS имеет высокий потенциал и массу приложений в зондировании и исследовании морского льда, в частности для исследования труднодоступного и жесткого морского ледяного покрова.

4. Дистанционное зондирование земли и водной поверхности с применением ГНСС

4.1 Мониторинг озер и заболоченной местности

Трудно исследовать озера при помощи обычных геодезических инструментов. И в то время как ширина полосы съемки альтиметрического спутника велика, пространственное разрешение слишком мало, чтобы контролировать небольшие регионы. Отраженные сигналы GPS могут зафиксировать характеристики небольших объектов, таких как озера. Тройхафт измерил высоту поверхности озера Кратер в центральном Орегоне с точностью 2 см за 1 секунду, используя отраженный от озера сигнал GPS. К тому же, мощности отраженного сигнала от сухой и влажной поверхности земли различны, что позволяет составлять карты водной и болотной местности.

4.2. Измерение влажности почвы

Знание влажности почвы важно для гидрологии, климатологии и сельского хозяйства. Измерение содержания влаги в почве может спрогнозировать потенциальную опасность наводнений, узнать энергетический баланс между Землей и Атмосферой. Раньше влажность почвы определялась с использованием пассивных радиометров и активных радарных датчиков. Однако, эти два способа дистанционного зондирования довольно дорогие. Отраженный от земной поверхности сигнал аналогичен сигналу, отраженному от поверхности океана. Основные отличия зависят от различия диэлектрической проницаемости, неровности поверхности и возможности наличия растительного покрова. Мастерс определял влажность почвы на пиковой мощности сигнала GPS в USDA/SCAN (Государственный департамент Соединенных Штатов по сельскому хозяйству, почве и анализу климата), расположенном на экспериментальном полигоне центральной равнины Колумбии. Карцберг так же успешно оценил отражающую способность диэлектрической проницаемости почвы, используя отраженный сигнал GPS.

Кроме того, многолучевость сигнала GPS при отражении от земной поверхности сети может быть связана со степенью влажности поверхности почвы. Недавно был получен интересный результат при анализе колебаний вблизи поверхности почвы на площади 300 м², соответствующий колебаниям влажности почвы в верхнем слое почвы, измерявшимися обычными датчиками. Результаты

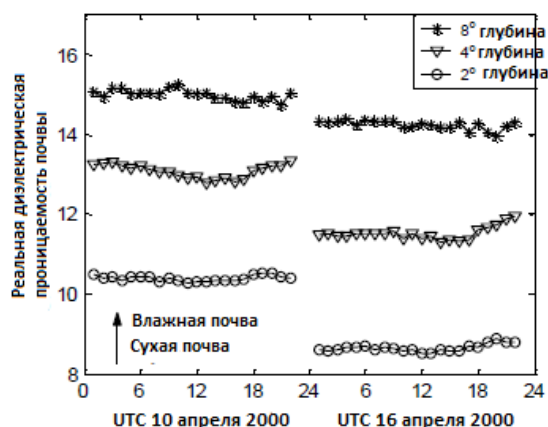


Рис 3. Диэлектрическая проницаемость на пиковой мощности сигнала GPS в USDA/SCAN на экспериментальном полигоне центральной равнины Колумбии, модифицированная Мастерсом.

указывают на возможность дистанционного зондирования почвы с использованием наземных многоходовых сигналов GPS. В будущем существующая глобальная сеть GPS с более чем тысячью приемников GPS, работающая по всему миру, может служить инструментом для оценки содержания влаги в почве в режиме реального времени для гидрологических и климатических исследований, особенно для непрерывной сети IGS (Международная сеть обслуживания ГНСС).

4.3 Измерение толщины земного льда и снега

Снег и лед на земле являются важными компонентами климатической системы и важными компонентами хранения в гидрологическом цикле. Тем не менее, наблюдения распределения снега редки и продукты дистанционного зондирования доступны лишь в небольших масштабах (например, по телеметрии снежного покрова США SNOTEL). Поскольку толщину льда можно узнать по амплитуде отраженного сигнала в зависимости от угла падения и по разности амплитуд у сигналов различной поляризации, толщина льда может быть получена из отраженных сигналов GPS. Кроме того, изменение снежного покрова также контролируется с помощью многоходовой модуляции сигнала GPS на земле. Результаты исследований 2009 года в Колорадо показали точное согласование оценки высоты снежного покрова при помощи GPS, полевых измерений, а так же ультразвуковых датчиков.

5. Выводы и обсуждение

Земная поверхность традиционно исследуется при помощи специальных передатчиков и приемников с довольно низким пространственным разрешением (с десятидневным периодом и с высоты порядка 300 км). В то время как GPS, будучи только приемником, может измерить экологические параметры поверхности Земли как новый, очень точный, непрерывный, всепогодный и работающий практически в режиме реального времени инструмент. Преломленные сигналы со спутников ГНСС, вместе с глобальными наблюдениями, могут помочь узнать параметры атмосферы с высоким разрешением. Например, состояние тропосферного водяного пара, температуру и давление тропопаузы, электронный профиль плотности. Эти параметры атмосферы являются очень полезными в области метеорологии, климатологии и космической погоды, а так же для того, чтобы понять связь твердой Земли и атмосферы. По отраженным сигналам ГНСС от океана и земной поверхности можно определять высоту поверхности воды, скорость и направление ветра над океаном, глубину воды, толщину снега и льда, которые так же могут быть измерены другими независимыми методами, такими как спутниковая альтиметрия, измерение с буев, радиолокационных рефлектометров, с помощью микроволновых радиометров и зондов. Таким образом, отраженные от поверхности земли и преломленные в атмосфере сигналы GPS в L-диапазоне, которые могут быть приняты на простых устройствах на любом типе самолета,

НПК Джи Пи Эс Ком. 109387, Россия, г. Москва, ул. Люблинская, д.42, офис 509

Тел.: (495) 232 2870 Факс: (495) 232 232 2870 www.gpscom.ru

Email: info@gpscom.ru

как ожидается, совершат революцию в зондировании атмосферы, океана, Земли и в гидрологическом картографировании. Установленный на борту спутника, или космического корабля, GPS-приемник даст нам уникальную возможность использовать GPS-зондирование для определения различных параметров окружающей среды. С увеличением числа спутников ГНСС в будущем, отраженные и преломленные сигналы GPS станут мощным источником получения данных для ученых для лучшего понимания характеристик мирового океана и поверхности земли, для сохранения океана, изучения изменений климата и глобального потепления. Особенно для изучения опасных геологических процессов, сложной поверхности Земли и океана во всем мире. Также, ожидается применение новых разработок в предстоящих космических миссиях, например в тропосферных измерениях. Кроме того, эти технологии должны быть бесплатными для общества и охватывать весь земной шар. Бистатические отраженные сигналы ГНСС должны быть улучшены для получения более подробной информации о таких характеристиках Земли, как океанические волны, вихри, соленость океана, внутреннее состояние морского льда, высота штормовых наносов, цунами, движениях селей, оползней, а так же для предупреждения катастроф.

Литература

Armatys M., Masters, D., Komjathy, A., Axelrad, P., Garrison, J.L. Exploiting GPS as a new oceanographic remote sensing tool. Proc. ION National Technical Meeting, Anaheim, CA, 339-347, 2000.

Cardellach, E., Ruffini, G., Pino, D., Rius, A., Komjathy, A., Garrison, J.L. Mediterranean Balloon Experiment: ocean wind speed sensing from the stratosphere, using GPS reflections. Remote Sensing of Environment, 88: 351-362, 2003.

Clifford, C.F., Tatarskii, V.I., Voronovich, A.G. Zavorotny, V.I. GPS Sounding of Ocean Surface Waves: Theoretical Assessment, Proceedings of the IEEE International Geosciences and Remote Sensing Symposium: Sensing and Managing the Environment, IEEE, Piscataway, NJ, 2005-2007, 1998.

Derek, D.F., Benjamin, M.H. Remotely sensing the Earth atmosphere using GPS: The GPS/MET data analysis. Journal of Atmospheric and Oceanic Technology, 16: 989-1002, 1999.

Feng, D., Herman B.M. Remotely sensing the earth's atmosphere using the Global Positioning System (GPS)- The GPS/MET data analysis. Journal of Atmospheric and Oceanic Technology, 16, 989-1002, 1999.

НПК Джи Пи Эс Ком. 109387, Россия, г. Москва, ул. Люблинская, д.42, офис 509

Тел.: (495) 232 2870 Факс: (495) 232 232 2870 www.gpscom.ru

Email: info@gpscom.ru

Garrison, J.L., Katzberg, S.J. Howell, C.T. Detection of Ocean Reflected GPS Signals: Theory and Experiment, Proc. the IEEE Southeast, Blacksburg, USA, 12-14 April, pp. 290-294, 1997.

Garrison, J.L. Katzberg, S. The application of reflected GPS signals to ocean and wetland remote sensing, In the Proceedings of the Fifth International Conference on Remote Sensing for Marine and Coastal Environments, San Diego, CA, 5-7 October, Vol. 1, pp. 522-529, 1998.

Garrison, J.L., Komjathy, A. Wind speed measurement from bistatically scattered GPS signals. IEEE. Transactions on Geosciences and Remote Sensing, 37:100-110, 1999.

Garrison, J.L., Komjathy, A., Zavorotny, V.U., Katzberg, S.J. Wind Speed Measurement from Forward Scattered GPS Signals. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 40(1): 50-65, 2002.

Germain, O., Ruffini, G., Soulat, F., Caparrini, M., Chapron, B. Silversten, P. The Eddy Experiment: GNSS-R Speculometry for Directional Sea-Roughness Retrieval from Low Altitude Aircraft. Geophysical Research Letters, 31, doi: 10.1029/2004GL020991, 2004.

Gleason, S., Hodgart, S., Sun, Y., Gommenginger, C., Mackin, S., Adjrard, M., Unwin, M. Detection and Processing of Bistatically Reflected GPS Signals from Low Earth Orbit for the Purpose of Ocean Remote Sensing. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 43(6): 1229- 1241, 2005.

Hajj, G.A., Romans, L.L. Ionospheric Electron Density Profiles Obtained with the Global Positioning System: Results from the GPS/MET Experiment. Radio Science, 33(1): 175-190, 1998.

Hall, C., Cordey, R., Multistatic scatterometry. Proc. IEEE Int. Geosci. Remote Sensing Symp., Edinburgh, Scotland, 13-16 Sept. pp. 561-562, 1988.

Jackson, T., Schmugge, J., Engman, E. Remote sensing applications to hydrology: soil moisture. Hydrological Sciences, 41(4): 517-530, 1996.

Jackson, T. J. Multiple resolution analysis of L band brightness temperature for soil moisture. IEEE Transactions on Geosciences and Remote Sensing, 39:151-164. 2001.

Jackson, T., Gasiewski, A., Oldak, A., Klein, M., Njoku, E., Yevgrafov, A., Christiani, S., and Bindlish, R. Soil moisture retrieval using the C-Band polarimetric scanning radiometer during the Southern Great Plains 1999 experiment. IEEE Transactions on Geosciences and Remote Sensing, 40:2151-2161. 2002.

НПК Джи Пи Эс Ком. 109387, Россия, г. Москва, ул. Люблинская, д.42, офис 509

Тел.: (495) 232 2870 Факс: (495) 232 232 2870 www.gpscom.ru

Email: info@gpscom.ru

Jakowski, N., Wilken, V., Mayer, C. Space Weather Monitoring by GPS Measurements Onboard CHAMP. *Space Weather*, 5, S08006, doi: 10.1029/2006SW000271, 2007.

Jin, S.G., Park, J., Wang, J., Choi, B., Park, P. Electron density profiles derived from ground-based GPS observations. *Journal of Navigation*, 59(3): 395-401, 2006.

Jin, S.G., Park, J. Cho, J. Park, P. Seasonal variability of GPS-derived Zenith Tropospheric Delay (1994-2006) and climate implications. *Journal of Geophysical Research*, 112, D09110, doi: 10.1029/2006JD007772, 2007.

Jin, S.G., Luo, O.F., Park, P. GPS observations of the ionospheric F2-layer behavior during the 20th November 2003 geomagnetic storm over South Korea. *Journal of Geodesy*, 82(12): 883-892, doi: 10.1007/s00190-008-0217-x, 2008.

Jin, S.G., Zhu, W., Afraimovich, E. Co-seismic ionospheric and deformation signals on the 2008 Mw 7.9 Wenchuan earthquake from GPS observations. *International Journal of Remote Sensing*, 31, 2010.

Katzberg, S.J., Garrison, J.L. Utilizing GPS to Determine Ionospheric Delay over the Ocean, NASA Technical Memorandum - 4750, December, 1996.

Katzberg, S., Torres, O., Ganoë, G. Calibration of reflected GPS for tropical storm wind speed retrievals"; *Geophysical Research Letters*, 33, L18602, doi: 10.1029/2006GL026825, 2006a.

Katzberg, S., Torres, O., Grant, M.S., Masters, D. Utilizing calibrated GPS reflected signals to estimate soil reflectivity and dielectric constant: Results from SMEX02. *Remote Sensing of Environment*, 100(1): 17-28, 2006b.

Katzberg, S. J., Dunion, J. Comparison of reflected GPS wind speed retrievals with dropsondes in tropical cyclones. *Geophysical Research Letters*, 36, L17602, doi:10.1029/2009GL039512, 2009.

Komjathy, A., Garrison, J.L., Zavorotny, V. GPS: a new tool for ocean science, *GPS World*, 50-56, 1999.

Komjathy, A., Zavorotny, V., Axelrad, P., et al. GPS Signal Scattering from Sea Surface: Wind Speed Retrieval Using Advances in Space Research 46 (2010) 111–117
7

Experimental Data and Theoretical Model, *Remote Sensing of Environment*, 73, 162-174, 2000a.

Komjathy, A., Maslanik, J.A., Zavorotny, V.U., Axelrad, P. Katzberg, S.J. Sea Ice Remote Sensing Using Surface Reflected GPS Signals. *Proceedings of the IEEE*

НПК Джи Пи Эс Ком. 109387, Россия, г. Москва, ул. Люблинская, д.42, офис 509

Тел.: (495) 232 2870 Факс: (495) 232 232 2870 www.gpscom.ru

Email: info@gpscom.ru

international Geosciences and Remote Sensing Symposium (IGARSS 2000), Honolulu, Hawaii, 24-28 July, 2855-2857, 2000b.

Komjathy, A., Armatys, M., Masters, D., Axelrad, P., Zavorotny, V.U. Katzberg, S.J. Developments in Using GPS for Oceanographic Remote Sensing: Retrieval of Ocean Surface Wind Speed and Wind Direction, Proceeding of the ION National Technical Meeting, Long Beach, CA, 22-24 January, 753 - 761, 2001.

Komjathy, A., Armatys, M., Masters, D., Axelrad, P., Zavorotny, V., Katzberg, S. Retrieval of Ocean Surface Wind Speed and Wind Direction Using Reflected GPS Signals. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, 21(3): 515–526, 2004.

Kostelecký, J., Klokočník, J., Wagner, C.A. Geometry and accuracy of reflecting points in bistatic satellite altimetry. *Journal of Geodesy*, 79(8): 421-430, 2005.

Larson, K.M., E.E. Small, E. Gutmann, A. Bilich, J. Braun, V. Zavorotny, Use of GPS receivers as a soil moisture network for water cycle studies. *Geophysical Research Letters*, 35, L24405, doi:10.1029/2008GL036013, 2008.

Larson, K. M., Gutmann, E.D., Zavorotny, U., Braun, J., Williams, M., Nievinski, F. Can we measure snow depth with GPS receivers?. *Geophysical Research Letters*, 36, L17502, doi:10.1029/2009GL039430, 2009.

Le Hénaff, M., De Mey, P., Mourre, B., Le Traon, P. Contribution of a Wide-Swath Altimeter in a Shelf Seas Assimilation System: Impact of the Satellite Roll Errors. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, 25(11): 2133–2144, 2008.

Lin, B., Katzberg, S.J., Garrison, J.L. et al. The Relationship between the GPS Signals Reflected from Sea Surface and the Surface Winds: Modeling Results and Comparisons with Aircraft Measurements, *Journal of Geophysical Research*, 104(C9): 20713-20727, 1998.

Livingstone, C.E., Onstott, R.G. , Arsenault, L.D. , Gray, A.L. , Singh, K.P. Microwave sea-ice signatures near the onset of melt. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, GE-25 (2): 174-187, 1987.

Lowe, S. T., Kroger, P., Franklin, G., LaBerecque, J. L., Lerma, J., Lough, M., Marcin, M. R., Muellerschoen, R. J., Spitzmesser, D., Young, L.E. A delay/doppler-mapping receiver system for GPS-reflection remote sensing. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 40(5): 1150 – 1163, 2002.

Mancini, M., Hoeben, R., Troch, P.A. Multifrequency Radar Observations of Bare Surface Soil Moisture Content: A Laboratory Experiment. *Water Resources Research*, 35(6): 1827-1838, 1996.

НПК Джи Пи Эс Ком. 109387, Россия, г. Москва, ул. Люблинская, д.42, офис 509

Тел.: (495) 232 2870 Факс: (495) 232 232 2870 www.gpscom.ru

Email: info@gpscom.ru

Martin-Neira, M. A Passive Reflectometry and Interferometry System (PARIS): Application to Ocean Altimetry, *ESA Journal*, 17(4): 331-355, 1993.

Martin-Neira, M, Caparrini, M., Font-Rosselo, J., et al. The PARIS concept: An experimental demonstration of sea surface altimetry using GPS reflected signals. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 39: 142-150, 2001.

Masters, D., Zavorotny, V., Katzberg, S., Emery, W. GPS Signal Scattering from Land for Moisture Content Determination. *Proceeding of the IEEE international Geosciences and Remote Sensing Symposium*, Honolulu, Hawaii, 24-28 July, 3090-3092, 2000.

Masters, D., Axelrad, A., Katzberg, S.J. Initial results of landreflected GPS bistatic radar measurements in SMEX02. *Remote Sensing of Environment*, 92, 507-520, 2004.

Melling, H. Detection of features in first-year pack ice by synthetic aperture radar (SAR). *International Journal of Remote Sensing*, 19(6): 1223-1249, 1998.

Njoku, E., Entekhabi, D. Passive microwave remote sensing of soil moisture, *Journal of Hydrology*, 184: 101-129, 1996.

Rius, A., Aparicio, J.M., Cardellach, E., Martin-Neira, M., Chapron, B. Sea Surface State Measured Using GPS Reflected Signals. *Geophysical Research Letters*, 29(23), doi:10.1029/2002GL015524, 2002.

Rocken, C. Analysis and validation of GPS/MET data in the neutral atmosphere. *Journal of Geophysical. Research*, 102: 29849-29866, 1997.

Rubashkin S.G., Pavel'ev, A..G, Yakovlev, O.I., et al. Reflection of Radar Waves by the Ocean Surface for Bistatic Radar Using Two Satellites. *Journal of Communications Technology and Electronics*, 38(9): 64-70, 1993.

Schmidt, T., Heise, S., Wickert, J., Beyerle, G., Reigber, C. GPS radio occultation with CHAMP and SAC-C: global monitoring of thermal tropopause parameters. *Atmos. Chem. Phys.*, 5, 1473–1488, 2005.

Schmidt, T.; Wickert, J.; Beyerle, G.; Heise, S. Global tropopause height trends estimated from GPS radio occultation data. *Geophysical Research Letters*, Vol. 35, L11806, 2008.

Serreze, M. C., Clark, M. P., Armstrong, R. L., McGinnis, D.A., ulwarty R.S. Characteristics of the western United States snowpack from Snowpack Telemetry (SNOTEL) data. *Water Resources Research*, 35, 2145-2160, doi:10.1029/1999WR900090, 1999.

НПК Джи Пи Эс Ком. 109387, Россия, г. Москва, ул. Люблинская, д.42, офис 509

Тел.: (495) 232 2870 Факс: (495) 232 232 2870 www.gpscom.ru

Email: info@gpscom.ru

Shohr, M.E. Field observations and model calculations of dielectric properties of Arctic sea ice in the microwave C-band. *IEEE Transactions on Geosciences and Remote Sensing*, 36(2): 463-478, 1998.

Syndergaard, S. On the Ionosphere Calibration in GPS Radio Occultation Measurements. *Radio Science*, 35(3): 865-883, 2000.

Thompson, D. R., Elfouhaily, T. M., Garrison, J. L. An improved geometrical optics model for bistatic GPS scattering from the ocean surface. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 43(12), 2810-2821. doi:10.1109/TGRS.2005.857895, 2005.

Treuhaft, R. N., Lower, S.T., Zuffada C et al. 2-cm GPS altimetry over Crater Lake. *Geophysical Research Letters*, 28(23): 4343-4346, 2001.

Ulaby, F., Dubois, P., Van, J. Radar mapping of surface soil moisture. *Journal of Hydrology*, 184: 57-84, 1996.

Wagner, C., Kloko, J. The value of ocean reflections of GPS signals to enhance satellite altimetry: data distribution and error analysis. *Journal of Geodesy*, 74, 128-138, 2003.

Ware, R. GPS sounding of the earth atmosphere. *GPS World*, 3: 56-57, 1992.

You, H., Garrison, J.L., Heckler, G., Zavorotny, V.U. Stochastic Voltage Model and Experimental Measurement of Ocean Scattered GPS Signals. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 42(10): 2160-2169, 2004.

Yunck, T.P., The Promise of Spaceborne GPS for Earth Remote Sensing, Presentation at the International Workshop on GPS Meteorology, Tsukuba, Japan, 14-16 January 2003.

Zavorotny, A.U., Voronovich, A.G. Scattering of GPS Signals from the Ocean with Wind Remote Sensing Application, *IEEE Transactions on Geosciences and Remote Sensing*, 38(2): 951-964, 2000.