

### **Исследование снежного покрова при помощи систем глобальной спутниковой навигации**

В.И. Луценко<sup>1</sup>, Д.О. Попов<sup>1</sup>, Цзянь Гуо (Qiang Guo)<sup>2</sup>, Юн Джин (Yu Zheng)<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Институт радиофизики и электроники им. А. Я. Усикова НАН Украины, 61000, Харьков, ул. Ак. Проскуры, 12, e-mail: [lutsenko@ire.kharkov.ua](mailto:lutsenko@ire.kharkov.ua)

<sup>2</sup>College of Information and Communication Engineering, Harbin Engineering University, P.R. of China, Rd. Nantong 145, Harbin, Prov. Heilongjiang, P.R. of China. e-mail: [guoqiang@hrbeu.edu.cn](mailto:guoqiang@hrbeu.edu.cn)

<sup>3</sup>School of Electronics and Information Engineering of Qingdao University, P.R. of China, Rd. Ningxia 308, Qingdao, Prov. Shandong, P.R. of China, e-mail: [cucecc@mail.ru](mailto:cucecc@mail.ru)

*Рассматривается вопрос о применении сигналов систем глобальной спутниковой навигации для диагностики подстилающей поверхности при наличии снежных покровов. Анализируется поведение навигационных сигналов в различные сезоны года, а так же при изменении толщины снежного покрова.*

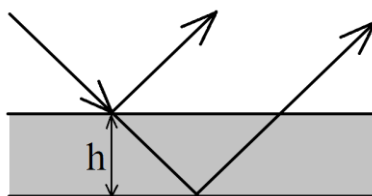
*The question of using signals of global satellite navigation systems for the diagnostics of the underlying surface in the presence of snow covers is considered. The behavior of navigation signals is analyzed in different seasons of the year, as well as with changes in the thickness of the snow cover.*

#### **Введение**

На сегодняшний день все больше возрастает интерес к использованию систем космического базирования для дистанционной диагностики земной поверхности и атмосферы Земли. Несмотря на широкий спектр космических программ, привлекательным является использование существующих систем спутниковой навигации, что позволяет существенно снизить финансовые затраты. Хорошим примером использования навигационных систем для диагностики атмосферы может служить технология GPSRO [1], предполагающая использование спутников GPS в связке с низкоорбитальными спутниками. Благодаря способности проникать глубоко в нижнюю тропосферу с использованием продвинутой техники слежения, система может наблюдать структуру пограничного слоя атмосферы и проникать близко к поверхности Земли, что позволяет получать оперативные глобальные модели прогноза погоды. В случае исследования земной поверхности при помощи ГНСС вопрос остается открытым. В ряде работ проводился анализ возможности использования спутников GPS для скаттерометрии морской поверхности [2] и суши в условиях городской застройки [3]. В данных работах показана возможность оценки уровня волнения морской поверхности, обнаружения областей отражения и оценки типов подстилающих поверхностей на основе анализа флуктуационных и трендовых составляющих принимаемых уровней сигналов. Целью данной работы является анализ возможности использования сигналов навигационных спутников для диагностики снежных покровов. Существующие радиометрические методы и технологии позволяют оценивать границы тающего снега, а также дают возможность оценки толщины сухого снега, однако зондирование необходимо проводить одновременно не нескольких длинах волн и осуществлять дополнительные трассовые измерения [4]. В свою очередь огромная сеть навигационных приемников и хорошее азимутальное покрытие ГНСС позволяет рассматривать эту систему как перспективную базу для исследования характеристик снежных покровов.

#### **Методика эксперимента**

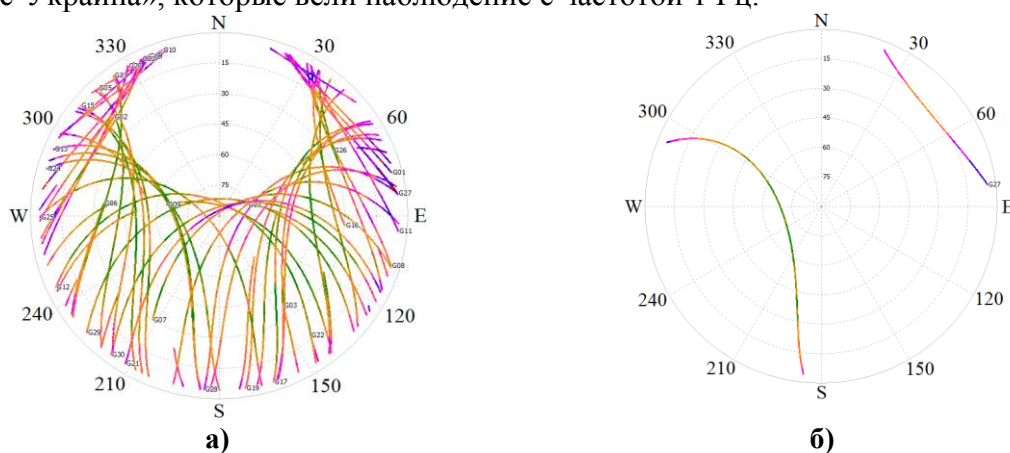
В случае использования ГНСС для диагностики атмосферы основным анализируем параметром является псевдодальность, позволяющая оценивать влияние среды на задержку сигнала. В случае с подстилающей поверхностью основным параметром является SNR (SignalNoiseRatio) и его флуктуации. В простейшем случае постановка задачи сводится к тому, что в точку приема, в случае многолучевости, приходит как прямой, так и отраженный спутниковый сигнал. При наличии снежного покрова на поверхности будет происходить затухание и рассеяние отраженного сигнала, величина затухания которого будет зависеть от диэлектрических характеристик снега.



**Рис. 1. Отражение навигационного сигнала от снежного покрова.**

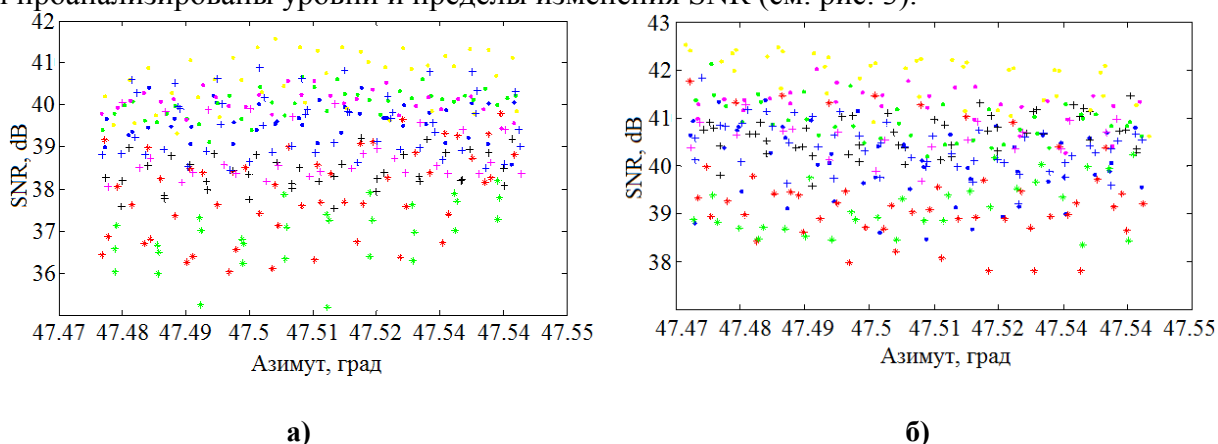
Снег представляет собой природное минеральное образование, существование которого протекает вблизи тройной точки воды, поэтому процессы его образования содержат неопределенность [5]. Таким образом, каждый слой снежного покрова рассматривается как многокомпонентная смесь, состоящая из льда и воздуха в случае сухого снега и льда, воздуха и воды – в случае влажного снега. В случае снежного покрова необходимо рассмотреть свойства двух основных составляющих снега – воды и льда. Наличие влаги во время таяния приводит к значительному изменению ее физических и радиофизических характеристик [5]. Снежный покров может быть представлен двумя способами: как непрерывное неоднородное пространство или как многослойная структура, где каждый слой имеет свое значение эффективной диэлектрической проницаемости [6].

В рамках данного исследования анализировались изменения уровня сигналов навигационных спутников при различных сезонах года, а также при изменении структуры и плотности снежного покрова. Для этого были проанализированы траектории движения спутников (см. рис. 2) и выбраны те участки, где преобладает равнинная местность без застроек. В качестве основной системы для анализа использовались спутники GPS, что обусловлено периодом повторения траектории и широкой сеткой охвата всех азимутальных направлений. В качестве измерительной аппаратуры использовались одночастотные приемники СН-4719 производства ООО «Навис-Украина», которые вели наблюдение с частотой 1 Гц.



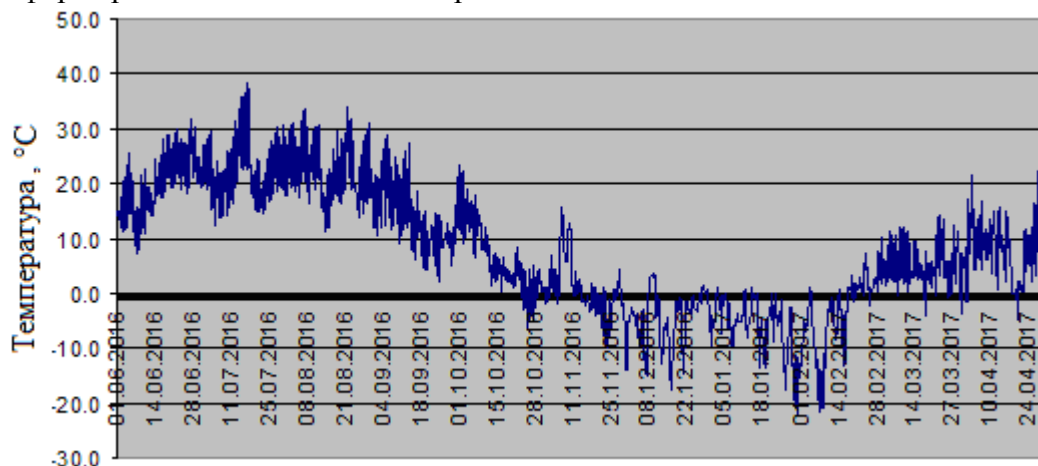
**Рис.2. Траектории движения спутников GPS (а) и траектория анализируемого спутника.**

В первую очередь был проведен анализ влияния наличия снежного покрова на уровни сигналов. Для этого в каждом из месяцев было выбрано несколько типовых дней и проанализированы уровни и пределы изменения SNR (см. рис. 3).



**Рис. 3. Изменение уровня сигнала навигационных спутников GPS в различные периоды года: а) G11, б) G27, «\*» – снежные месяцы, «+» – переходные месяцы, «<» – месяцы формирования вегетатики.**

Опираясь на данные метеорологических станций, а также температурные изменения (см. рис. 4), в исследуемый период времени, было определено, что снежный покров начинал формироваться с 26.11.2016 и пролежал до 01.03. 2017.



**Рис. 4. Изменение температуры в период с 01.06.2016 по 01.05.2017.**

Как видно из рис. 3 в месяцы, когда на подстилающей поверхности наблюдается снежный покров, происходит среднее снижение общего уровня сигнала на 2.5 дБ и увеличение амплитуды изменения SNR в 2 раза, по сравнению с аналогичными измерениями в месяцы летне-осеннего периода. Отметим, что, несмотря на аналогичные изменения уровней сигналов для различных спутников необходимо учитывать изначальное поведение навигационных сигналов, которые могут варьироваться в зависимости от траектории движения спутника и диаграммы направленности приемной антенны. Также можно отметить, что наибольший уровень сигнала можно наблюдать в месяцы с июля по сентябрь, что может быть связано с повышением коэффициента преломления тропосферы в этот период.

Следующим шагом исследований было сравнение уровней сигнала при изменении физико-механических свойств снежного покрова. При качественном описании типа снега, его можно классифицировать как: фрикционно-связной (сухой снег влажностью до 12%); фрикционный (снег с отсутствием механических связей между зёрнами льда);

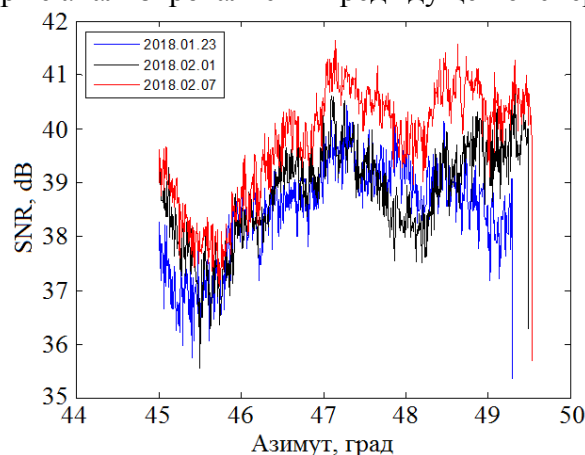
связной (Снег с влажностью более 12%, обладающий высокой пластичностью); корковый [5]. Для анализа было выбрано 3 промежутка времени, представляющие различные состояния снежного покрова:

- наблюдение фрикционно-связного снега – 2018.01.23 (средняя высота СП составляла 21 см);

- этап насыщения снега влагой и его утрамбовки – 2018.02.01 (средняя высота СП – 13 см);

- этап формирования коркового снега – 2018.02.07 (средняя высота СП – 2.5 см).

На рис. 5 представлены заходы спутника в азимутальном направлении на равнинные участки местности, которые анализировались в предыдущем эксперименте.



**Рис. 5. Сравнение уровней сигналов для спутника G25 при различных характеристиках снежного покрова.**

Видно, что наибольший уровень сигнала наблюдается в дни с минимальной толщиной снежного покрова, однако для перехода к количественным оценкам влияния снега на уровень сигнала необходимо создание математических моделей, связывающих электрические параметры снежного покрова с плотностью, влажностью и температурой.

### **Результаты эксперимента и выводы**

В результате проведенных исследований показана возможность использования сигналов навигационных спутников для дистанционной диагностики снежных покровов на суше. Предварительные эксперименты показывают, что уровни сигналов навигационных спутников чувствительны к изменению состояния подстилающей поверхности, однако для определения физико-механических свойств снежного покрова необходимо проведение дополнительных измерений поведения сигналов, на основе которых можно будет судить об уровне затуханий для различных спутников, просвечивающих аналогичные участки местности. Сложность анализа получаемых данных заключается в том, что формирование снежного покрова – многоэтапный процесс, поэтому при дистанционном зондировании СВЧ-сигналами необходимо учитывать слоистую структуру снега, а соответственно требуется создание его электродинамической модели.

### **Литература**

1. Lidia Cucurull. Global Positioning System (GPS) Radio Occultation (RO) Data Assimilation / JCSDA DA Colloquium, Stevenson, WA, July 2009.
2. Сеницкий В. Б. О возможности использования излучения спутников GPS для диагностики морского волнения / В. Б. Сеницкий // Радиофизика электроника.– 2010.– 1(15), №3.– С. 58-64.

3. Исследование подстилающей поверхности при помощи излучения глобальной навигационной спутниковой системы / В. И. Луценко, Д. О. Попов, И. В. Луценко // Радиофизика и электроника.– 2016.– Т. 7(21) №1.–С. 31-39.
4. Способ определения высоты снежного покрова на льду акваторий // Патент РФ № 2460968. 2012 Бюл. № 25. / Г. А. Лебедев, А. И. Парамонов.
5. Узлов В. А. Основные физические параметры снежного покрова / В. А. Узлов, Г. И. Шишков, В. В. Щербаков // Труды Нижегородского государственного технического университета им. Р.Е. Алексева.–2014.– № 1(103).– С. 119-129.
6. Stogrin A. Study of the Microwave Brightness Temperature of Snow from the Point of View of Strong Fluctuation Theory // IEEE Trans. GeosciencesRemoteSensing.– 1986.– V. GE24., N. 2.– 220 p.