

## **КВАНТОВЫЙ АРКТИЧЕСКИЙ НИВЕЛИР НА ОСНОВЕ КЛАСТЕРА НАНО-СПУТНИКОВ**

А.В. Наумов, Ф.Р. Смирнов, В.Ф. Фатеев

ФГУП «ВНИИФТРИ», Московская обл., п. Менделеево

Одной из важнейших задач информационного обеспечения Арктического региона является создание единой высотной основы системы арктических островов. Современные методы создания высотной основы базируются на использовании опорных точек с известной высотой (Кронштадтский футшток, Охотский футшток и др.). Нормальные и ортометрические высоты в других разнесенных точках на поверхности Земли определяются на основе применения классических нивелиров, построенных на базе лазерных тахеометров и других оптических приборов. Вместе с тем, классический подход принципиально неприменим при передаче значения высоты между удаленными островами на акватории Арктики. Кроме того, погрешность определения высот в классическом нивелире накапливается с ростом количества нивелирных ходов от исходного футштока.

Альтернативный подход к определению высот в системе островов основан на измерении разности гравитационных потенциалов и соответствующей разности ортометрических высот между исследуемыми точками на поверхности Земли. Согласно общей теории относительности, физическими эффектами, непосредственно связанными с разностью гравитационных потенциалов, являются эффекты гравитационного смещения частоты и гравитационного замедления времени в высокостабильных квантовых часах, являющихся хранителями эталонных частот и эталонных шкал времени.

В 2015 г. на Пражской конференции IAG была принята специальная резолюция «Об определении и реализации международной системы отсчета высот (IHRС)». Согласно этой резолюции, за опорную поверхность при определении высоты следует принять эквипотенциальную поверхность геоида, а высоту любой точки на поверхности Земли отсчитывать относительно нее. Эти высоты предлагается определять через разность гравитационных потенциалов между геоидом и исследуемыми точками, которая линейно связана с ортометрической высотой точки на поверхности Земли относительно геоида.

Комплекс средств, необходимых для измерения разности гравитационных потенциалов и соответствующей разности ортометрических высот, включает пару разнесенных квантовых часов и систему сличения их частот и шкал времени. Такой комплекс называется *квантовым нивелиром* [1,2]. Сличение частот и шкал времени квантовых часов может выполняться с использованием волоконно-оптических линий связи (ВОЛС), дуплексных двунаправленных систем сличения времени через спутники (например, с помощью отечественной системы «Дуплекс»), радиоинтерферометров со сверхдлинной базой (РСДБ), квантово-оптических систем (КОС), а также сигналов глобальных навигационных спутниковых систем (ГНСС). По сравнению с классическим нивелиром, квантовый нивелир может обеспечить высокоточное глобальное нивелирование, поскольку его погрешность слабо зависит от расстояния между исследуемыми точками. В целом, квантовые часы с нестабильностью  $10^{-16}$ ,  $10^{-17}$ ,  $10^{-18}$  позволяют определять разность ортометрических высот глобально разнесенных точек с погрешностью, соответственно, 90 см, 9 см и 9 мм.

В Российской Федерации созданы несколько макетов квантовых нивелиров на водородных квантовых часах, в том числе, с участием авторов [1,2,3]. За рубежом аналогичные исследования по измерению гравитационных эффектов проводятся на оптических стандартах частоты, соединенных ВОЛС [4,5].

В Арктическом регионе использование ВОЛС пока невозможно. Использование РСДБ также невозможно, поскольку это предполагает использование больших антенн. Применение КОС нецелесообразно в силу крайне неустойчивого состояния облачности во время полярной ночи. Использование двусторонней радиосистемы «Дуплекс», которая обеспечивает связь через геостационарные спутники, также невозможно, поскольку зона видимости этих спутников с Земли ограничивается широтами не более  $70^{\circ}$ - $75^{\circ}$ . Наконец, использование сигналов ГНСС с частотами 1,2-1,6 ГГц ограничено большими погрешностями измерений, связанными с неустойчивым распространением радиоволн в очень переменной полярной ионосфере.

Цель исследований состояла в обеспечении высокоточных измерений разности гравитационных потенциалов и ортометрических высот между материком и арктическими островами на основе использования радиосигналов, излучаемых с борта низкоорбитальных наноспутников.

Орбитальная группировка спутников образует единый полярный орбитальный кластер, который содержит несколько наноспутников, находящихся на полярных орбитах с высотой 500-600 км. Каждый спутник оснащен передатчиком фазоманипулированного радиосигнала с частотой излучения в Ки-диапазоне и мощностью 1-2 Вт. Стабильность задающей частоты бортового передатчика, а также формирование бортовой шкалы времени в виде последовательности секундных импульсов обеспечивается либо кварцевым стабилизированным генератором, либо малогабаритным бортовым рубидиевым стандартом частоты, созданным во ФГУП «ВНИИФТРИ» [6]. Стационарный наземный измерительный комплекс содержит стационарные (базовые) квантовые часы и приемную измерительную аппаратуру с антенной, отслеживающей положение спутника, которые обеспечивают измерение расхождения бортовой и наземной стационарной шкалы времени в зоне прямой видимости наноспутника. Перебазируемый наземный измерительный комплекс содержит перебазируемые квантовые часы (водородные или оптические), а также приемную измерительную аппаратуру со следящей антенной. Перебазируемые квантовые часы и приемная аппаратура обеспечивают измерение текущего расхождения бортовой шкалы времени наноспутника и наземной мобильной шкалы времени, формируемой перебазируемыми квантовыми часами.

Перед измерениями расхождений шкалы времени координаты стационарных и перебазируемых квантовых часов определяются с помощью наземных геодезических комплексов навигационной аппаратуры потребителей (НАП) ГНСС. Параметры орбит наноспутников, участвующих в измерениях, непрерывно уточняются с помощью бортовых НАП ГНСС. Измерения задержки бортового сигнала на Земле на стационарном и перебазируемом измерительных комплексах производятся относительно одной и той же бортовой секундной метки. Разность результатов измерений, выполненных на каждой станции, за вычетом рассчитанной по их координатам задержки сигнала на линии «спутник-Земля», несет информацию об искомом расхождении шкалы времени стационарных и мобильных часов. Второе аналогичное измерение, выполненное через несколько суток, несет информацию об искомой разности ортометрических высот стационарных часов, размещенных, например, на материке, и перебазируемых часов, размещенных на удаленном острове.

Предлагаемое практическое решение на основе использования кластера полярных наноспутников направлено на повышение точности и оперативности измерения разности ортометрических высот арктических островов, а также на повышение пространственной плотности квантовой сети средств уточнения и мониторинга высотной основы акватории Российской Арктики.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 23-67-10007, <https://rscf.ru/project/23-67-10007/>

**Список литературы:**

1. Фатеев В.Ф., Рыбаков Е.А. Экспериментальная проверка квантового нивелира на мобильных квантовых часах. ДАН, Физика, технические науки, 2020. Т. 495. С. 34–37.
2. Фатеев В.Ф., Смирнов Ф.Р., Донченко С.С. Измерение эффекта гравитационного замедления времени дуплексным наземным квантовым нивелиром // Измерительная техника № 2, 2022. С. 22-27.
3. Chronometric Measurement of Orthometric Height Differences by Means of Atomic Clocks / S.M. Kopeikin, V.F. Kanushin, A.P. Karpik [et al.] // Gravitation and Cosmology, 2016. Vol. 22, № 3, pp. 234–244.
4. Geodesy and metrology with a transportable optical clock / J. Grotti, S. Koller, S. Vogt [et al.] // Nature Phys 14, 2018, pp. 437–441.
5. Test of general relativity by a pair of transportable optical lattice clocks / M. Takamoto, I. Ushijima, N. Ohmae [et al.] // Nat. Photonics 14, 2020, pp. 411–415.
6. Зотов Е.А., Парехин Д.А. Исследование метрологических характеристик сверхминиатюрного квантового стандарта частоты. Альманах современной метрологии, 2020, №3, с. 128-137.