
СТАТИСТИЧЕСКАЯ
РАДИОФИЗИКА

УДК 535.243.3

МОДЕЛИРОВАНИЕ И ИЗМЕРЕНИЕ ТОЛЩИНЫ СНЕЖНОГО ПОКРОВА С ПОМОЩЬЮ ЛАЗЕРНОГО ДАЛЬНОМЕРА

© 2023 г. В. И. Григорьевский^{а, *}, В. Н. Марчук^а, Я. А. Тезадов^а

^аФрязинский филиал Института радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова РАН,
пл. Введенского, 1, Фрязино Московской обл., 141190 Российская Федерация

*E-mail: vig248@rambler.ru

Поступила в редакцию 15.06.2022 г.

После доработки 15.06.2022 г.

Принята к публикации 25.06.2022 г.

Представлены результаты работы по определению высоты снежного покрова на участке с относительно ровным рельефом местности с помощью лазерного дальномера. Данные по толщине снежного покрова определяли по зависимости разности расстояний от точки отражения до дальномера при наличии снежного покрова и без него в зимне-весенний период. Проведено моделирование определения толщины снежного покрова в предположении небольших неровностей обмеряемой поверхности. Показано, что данные моделирования могут расходиться с экспериментальными результатами вплоть до величин ~200 мм даже на относительно ровных участках с уклоном менее 1°, что в некоторых случаях недостаточно для прогнозирования воздействия снега на заснеженные объекты. Проведено сравнение с другими методами измерений высоты снежного покрова, обсуждаются возможные применения используемой методики в задачах мониторинга и дистанционного зондирования.

DOI: 10.31857/S0033849423010059, EDN: CCUAOG

ВВЕДЕНИЕ

Определение толщины снежного покрова дистанционными методами является актуальной задачей для многих областей экономики, например, для оценки объема и массы снега на крышах зданий и сооружений, для предупреждения схода снежных лавин в горных местностях, для прогнозирования урожайности сельскохозяйственных культур, определения степени опасности весенних наводнений и паводков, для прогноза климатических изменений и т.д. Известны работы для определения толщины снежного покрова с помощью лазерного дальномера и георадара с возможным расположением их на летательном аппарате [1–3]. Представленные в этих работах методики могут охватывать большие территории и достаточно оперативно получать данные. Однако для этого необходимо привлечение летающих средств, например БПЛА (беспилотные летательные аппараты), GPS-приемники для привязки к координатам местности, приемно-передающую аппаратуру связи, мощные аккумуляторные батареи и достаточно сложную георадарную технику. К тому же разрешающая способность таких измерений, в некоторых случаях недостаточна, поскольку пятно излучения георадара на поверхности снега, определяющее разрешающую способность, достаточно большое, более 1 м в диаметре, в силу чего высоту полета

БПЛА стремятся поддерживать на минимальном уровне от Земли порядка 1...2 м. Это накладывает особые требования на высокоточное управление летательным аппаратом и снабжение его, как правило, лазерным высотомером [3]. Спутниковые методы определяют высоту снежного покрова, в основном в глобальном масштабе, из-за большой высоты пролета спутника. Эти методы хорошо подходят для оценки влагозапаса больших территорий в несколько десятков и сотен километров, а также для прогностических целей изменения климата в отдельных районах Земли [4, 5]. Например, в работе [5] при обработке спутниковых измерений высоты снежного покрова над Казахстаном за последние годы было определено, что толщина снежного покрова зимой снижается, а начало схода снега сдвигается на более ранние сроки. Также известен метод определения толщины снежного покрова, для которого необходим лишь лазерный дальномер, который устанавливается в горной местности в лавиноопасных районах и определяет толщину снежного покрова по зависимости разности расстояний от точки отражения до точки расположения дальномера при наличии снежного покрова и без него [6, 7]. Рассмотренный в указанных работах метод специфичен для горной местности и применяется для прогноза схода снежных лавин. В данном методе необходимы как



Рис. 1. Общий вид обмеряемого участка.

измерения в летний, бесснежный, так и в зимний заснеженный период. Однако каких-либо параметров используемой аппаратуры и параметров охвата территории такой станцией слежения не приводится. В настоящее время существует много разновидностей лазерных трехмерных сканеров и тахеометров, осуществляющих съемку местности за достаточно малый промежуток времени, однако, на наш взгляд, такое сканирование является избыточным, поскольку большие массивы точек достаточно сложны в обработке и, кроме того, трехмерные сканеры достаточно дороги.

Цель данной работы — моделирование и экспериментальное исследование определения толщины снежного покрова, оценка точности моделирования по измерениям лишь в зимний период времени на сравнительно ровных рельефах с привлечением минимального количества оборудования, а также определение возможного энергетического потенциала лазерного дальномера, применяемого для прогноза и предупреждения неординарных событий, таких как обрушение крыш аквапарков, складов, экстраординарных паводков и т.д.

1. ОПИСАНИЕ УСЛОВИЙ, АППАРАТУРЫ И МЕТОДИКИ ИЗМЕРЕНИЙ

Для моделирования и измерений был выбран сравнительно ровный участок местности размером $\sim 100 \times 100$ м с небольшим уклоном не более ~ 1 град к горизонту (рис. 1). Лазерный дальномер с опорно-поворотным устройством по двум координатам (по углу места и по азимуту) был установлен на третьем этаже кирпичного здания, что

позволяло перемещать пятно лазера в пределах $\sim 0...90$ град по углу места и $\sim 0...90$ град по азимуту. Погрешность угловой наводки пятна лазера составляла менее 0.1 град, что давало дискретность сканируемых точек в линейной мере не более 0.5 м на максимальных расстояниях $70...100$ м. В качестве лазерного дальномера был использован прибор с выходной мощностью лазерного излучения ~ 0.5 Вт на рабочей длине волны 1550 нм, являющейся безопасной для глаз человека в указанном диапазоне выходной мощности. Диаметр приемного объектива дальномера составлял 4 см, расходимость пучка излучения была не более 1 мрад, а погрешность прибора — не более ~ 1 мм. Проводилось сканирование участка и вдоль, и поперек луча. Как показывают теоретические оценки, принимаемый оптический сигнал составлял величину $\sim 10^{-8}...10^{-9}$ Вт при измеряемых расстояниях $\sim 20...100$ м, что обеспечивало соотношение сигнал/шум не менее ~ 5 на самых дальних измеряемых расстояниях даже при скользких углах падения излучения на снег. Коэффициент отражения светового излучения от снега составляет величину $\sim 0.6...0.2$ в зависимости от угла сканирования. Геометрия сканирования вдоль и поперек луча показана на рис. 2.

При сканировании вдоль луча угол сканирования увеличивался от ~ 50 до ~ 80 град и измерения захватывали бетонный забор, расположенный на расстоянии ~ 70 м от точки расположения дальномера. Высота H была известна, и она являлась реперной величиной, измеряемой от точки расположения дальномера до уровня бетонной отмостки фундамента здания. Формула для расчета высоты снежного покрова h при сканировании выглядит следующим образом:

$$h = (D_z - D_c) \cos \alpha, \quad (1)$$

где D_z — измеренное дальномером расстояние до земли, D_c — измеренное расстояние до снега, α — угол между вертикалью и лучом лазера (угол сканирования). При моделировании измерений толщины снега лишь по измерениям расстояния до уровня снега определялась величина

$$h_{mc} = (H / \cos \alpha - D_c) \cos \alpha = H - D_c \cos \alpha, \quad (2)$$

где h_{mc} — модельная величина толщины снежного покрова без учета рельефа местности, $H = \text{const}$ — высота расположения дальномера над уровнем земли.

Вторая определяемая величина толщины снежного покрова учитывала рельеф местности, который получался в виде полинома из h_{mc} . При таком учете определяли модельную высоту снежного покрова h_{mc}^1 с учетом рельефа местности по формуле

$$h_{mc}^1 = h_{mc} - F(\alpha), \quad (3)$$

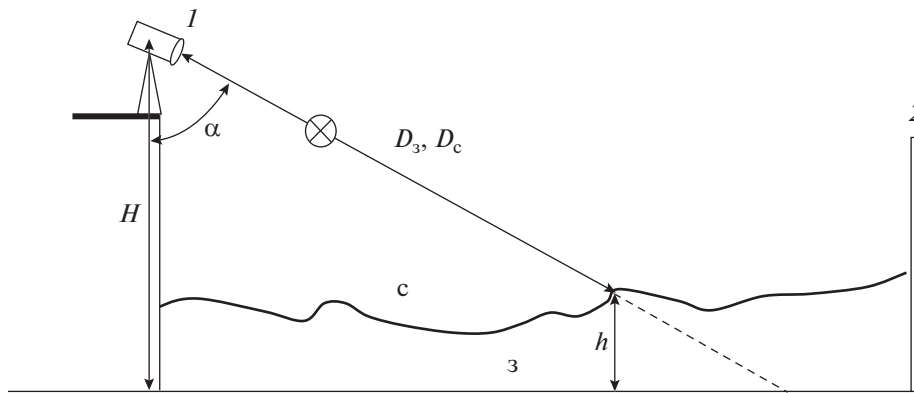


Рис. 2. Геометрия сканирования при измерении высоты снежного покрова: D_3 , D_c — измеряемые расстояния соответственно до земли и до поверхности снежного покрова, H — высота расположения дальномера, h — высота снежного покрова, α — угол сканирования, c — уровень снега, 3 — уровень земли; 1 — лазерный дальномер, 2 — бетонный забор; кружок с крестиком — направление сканирования поперек луча.

где $F(\alpha)$ — функция, аппроксимирующая рельеф местности по измерениям величины h_{mc} .

Для уточнения как общего снегосодержания территории, так и локальных изменений уровня снега, $F(\alpha)$ при моделировании варьировалась начиная от первого порядка полинома (наклон местности) до шестого порядка. Из формулы (2) видно, что h_{mc} определяется относительно реперного значения H , причем h_{mc} может быть и отрицательной величиной, если измеренное значение $D_c \cos \alpha$ будет больше H . Это условие выполняется, если рельеф местности понижается при увеличении угла сканирования. Функция $F(\alpha)$, аппроксимирующая рельеф местности нормировалась по одной калибровочной точке уровня снега. Такой точкой удобно выбрать, например, первую точку сканирования или точку, находящуюся под дальномером. Измерение реальной высоты снежного покрова в одной калибровочной точке проводится мерной рейкой. Если же толщина снежного покрова определяется по формуле (1), то расстояния D_c и D_3 — это реальные измеренные величины, которые коррелируют между собой, причем $D_3 > D_c$, поэтому вычисленная по формуле (1) реальная толщина снежного покрова будет всегда положительна.

2. РЕЗУЛЬТАТЫ ИЗМЕРЕНИЙ

На рис. 3 представлены результаты моделирования при сканировании местности вдоль луча.

Модельная толщина снега h_{mc}^1 была вычислена по формуле (3). Величина принимаемого дальномером сигнала в эксперименте постепенно снижалась по мере увеличения угла сканирования, а измеренное расстояние до поверхности снега плавно увеличивалось. При углах сканирования, где луч лазера попадал на бетонный забор (см. рис. 1), из-

меряемое расстояние менялось мало, поскольку забор был практически перпендикулярен лучу лазера. На всех кривых отчетливо видны два провала в районе углов сканирования ~ 61 и 78 град. Эти провалы обусловлены соответственно расчищаемой в течение зимы зоны коммуникационного колодца и зоны автомобильной дороги. Эти места хорошо видны на рис. 1. Первая зона обозначена металлической пирамидкой, а дорога видна несколько дальше по ходу сканирования вдоль луча.

Кривая 1 — реально измеренный уровень снега, который получен по формуле (1) обработкой данных сканирования как снежного покрова D_c , так и рельефа местности D_3 по тем же углам, что и при сканировании по поверхности снега. Первая

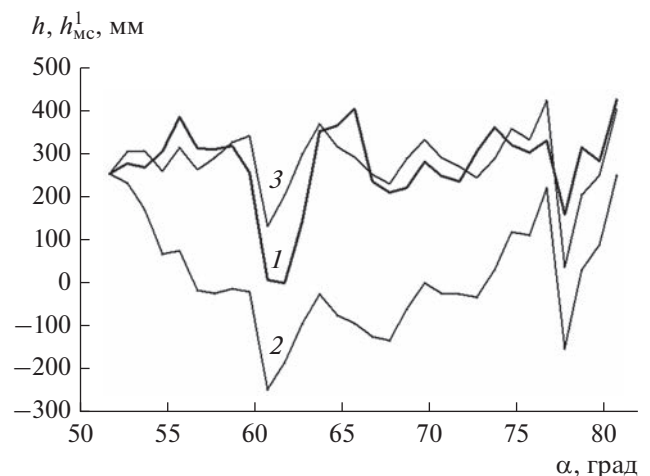


Рис. 3. Реальный уровень снежного покрова при сканировании вдоль луча (кривая 1), полученный при измерениях в зимне-весенний период, модельные уровни при экстраполяции рельефа местности полиномами первой степени (кривая 2) и третьей степени (кривая 3).

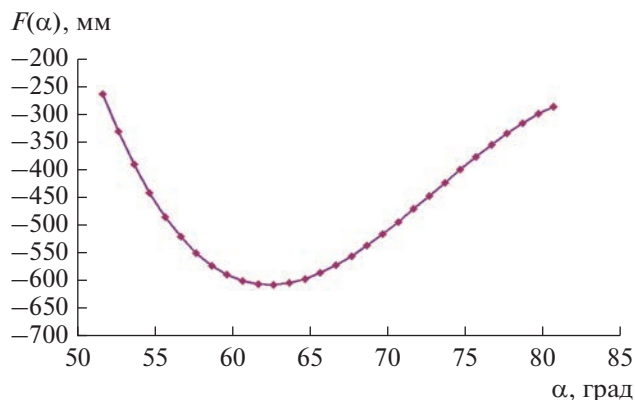


Рис. 4. Величина полинома 3-й степени $F(\alpha)$, аппроксимирующая уровень рельефа местности при сканировании вдоль луча.

точка для всех кривых — это калибровочная точка уровня снежного покрова, измеренная мерной рейкой. К этой точке приводились все модельные данные. Характерно, что провала в толще снега, вплоть до нулевого уровня, на автомобильной дороге не наблюдается. Это произошло потому, что по обеим сторонам дороги были сугробы из убираемого снега, причем ближний сугроб частично экранировал дорогу и не позволял пятну лазера попасть собственно на полотно дороги при больших углах сканирования.

Из рисунка видно, что линейной аппроксимации рельефа местности явно недостаточно для получения адекватных результатов, поскольку высота снежного покрова в среднем при такой аппроксимации составила величину ~ 0 мм, что обусловлено локальными неоднородностями рельефа. В некоторых областях углов сканирования толщина снега даже оказалась меньше нуля. Однако, начиная с аппроксимации рельефа кубическим полиномом, результаты моделирования стали адекватно отражать не только общее содержание снега вдоль линии сканирования, но и локальные отклонения в снежном покрове, особенно в районе коммуникационного колодца и в районе автомобильной дороги. Формула такого кубического полинома выглядит следующим образом:

$$F(\alpha) = -0.06984020 \times \alpha^3 + 15.31775 \times \alpha^2 - 1095.948 \times \alpha + 25104.92 \quad (4)$$

и показана на рис. 4. Видно, что рельеф местности в направлении сканирования имеет локальный минимум, величина которого порядка 350 мм.

Отклонение модельных данных от реальных величин толщины снежного покрова для экстремальных точек (типа зоны коммуникационного колодца) не превышает ~ 150 мм, а для сравнительно однородного рельефа местности не превышает ~ 100 мм. Отклонения модельных и реальных уров-

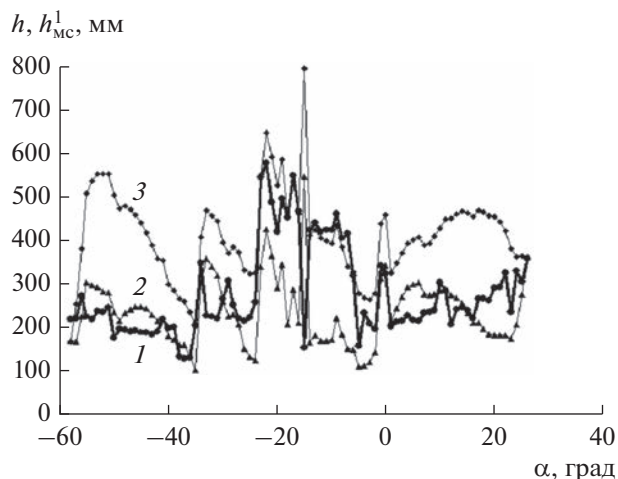


Рис. 5. Реальный уровень снежного покрова при сканировании поперек луча (кривая 1), полученный при измерениях в зимне-весенний период, модельные уровни при экстраполяции рельефа местности полиномами пятого (кривая 2) и шестого порядков (кривая 3).

ней снега в ~ 150 мм в локальных точках все же достаточно большие, что не дает основание использовать модельные данные для прогностических целей с высокой достоверностью. Суммарное же снегосодержание, или средний уровень снежного покрова в модельных данных для полинома 3-й степени получился достаточно точным, ошибка не более ± 10 мм от измеренных значений.

Результаты, полученные при сканировании местности поперек луча, несколько отличаются от результатов сканирования вдоль луча из-за более неоднородного рельефа местности. На рис. 5 представлены данные моделирования высоты снежного покрова для этого случая. Сигнал в отличие от случая сканирования вдоль луча в среднем практически не менялся. Острый пик в расстоянии $h^1_{МС}$ в районе -15 град на кривой 1 — это точка отражения от основания березы, находящегося на пути сканирования. Эта точка показана на графике в виде пикового сугроба высотой около 800 мм. Фактически это высота точки отражения от ствола березы. Модельные уровни снега, определяемые по формулам (1) и (3), представлены для полинома рельефа 5-й и 6-й степени. В рассматриваемом случае адекватное приближение к реальному уровню снежного покрова получено при использовании полинома рельефа местности начиная с 6-й степени и выше из-за более значительных локальных перепадов как в рельефе местности при поперечном сканировании, так и из-за больших локальных сугробов, которые видны на рис. 5 по обеим сторонам от точки максимума в районе угла сканирования -15 град (район отражения от березы).

3. ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Несмотря на относительно ровный рельеф исследуемого участка, наблюдается значительное различие результатов моделирования и реальных измеренных значений уровней снежного покрова. Различие в некоторых местах может достигать величины ~ 200 мм в локальных точках. На первый взгляд ровная исследуемая поверхность оказалась со значительными локальными перепадами рельефа местности, и моделирование не дает реальной картины даже для сравнительно плоского заснеженного участка. Ошибка в 200 мм в высоте снежного покрова на локальной неровности размером 20×10 м дает погрешность в определении массы снега в ~ 8 т, что достаточно много.

Моделирование, на наш взгляд, приемлемо только для оперативной оценки массы снега в зимних условиях и только на участках, хорошо выровненных в горизонтальной плоскости, без заметных локальных отклонений. Такие условия могут выполняться на сравнительно плоских крышах больших сооружений, например крышах аквапарков, складов, хранилищ и т.д. В горной, сильно изрезанной местности и на сравнительно больших не ровных участках необходимо обязательно иметь реперный уровень рельефа местности при сканировании ее в бесснежный период. Линейный диапазон обмеряемых участков для данного типа оборудования составил величину $\sim 100 \times 100$ м при высоте подъема дальномера над землей ~ 10 м. Размеры сканируемых участков могут быть увеличены в несколько раз, если увеличить диаметр приемного объектива дальномера, повысить мощность лазерного источника излучения, а также увеличить время усреднения результата расстояния для измеряемой точки. Для используемой аппаратуры время усреднения одного измерения составляло ~ 0.1 с, а погрешность измерения расстояния в 1 мм используемого дальномера может быть даже избыточна при измерениях на реальном рельефе местности, поскольку остатки растительности на земле, ветки, небольшие кусты дают шероховатость поверхности порядка 5 см в бесснежный период. Поэтому погрешность дальномерных измерений может составлять величину больше 1 мм, но для обмера плоских крыш, погрешность в 1 мм все же остается актуальной, поскольку ошибка, например, в 1 см в высоте снежного покрова на площади $\sim 100 \times 100$ м, ведет к ошибке определения массы снега в ~ 100 м³ или в ~ 20 т, что уже может быть критической величиной при аварийной ситуации.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведено моделирование и измерение высоты снежного покрова на сравнительно ровном

участке рельефа местности размером $\sim 100 \times 100$ м с использованием лишь одного лазерного дальномера. Показано, что результаты моделирования могут отличаться от реальных величин на величину ~ 200 мм на локальных участках. Учесть наклоны и перепады, особенно в изрезанной местности, например горной, достаточно сложно. На наш взгляд, моделирование можно использовать только при оперативных измерениях на площадях, строго выровненных в горизонтальной плоскости, таких как крыши аквапарков, складов и подобных крупных сооружений. При работе на открытой местности обязательно необходим реперный уровень рельефа, который должен быть измерен в бесснежный период. Энергетический потенциал используемого дальномера реально может быть увеличен в несколько раз, а обмеряемые размеры участков при этом могут составить до $\sim 500 \times 500$ м при расположении дальномера над измеряемой поверхностью приблизительно в 10 м и более.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

ФИНАНСИРОВАНИЕ РАБОТЫ

Работа выполнена в рамках государственного задания ИРЭ им. В.А. Котельникова РАН № 075-01133-22-00.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Марчук В.Н., Григорьевский В.И. // Тез. докл. Всерос. науч. конф. "Современные проблемы дистанционного зондирования, радиолокации, распространения и дифракции волн". Муром. 25–27 мая 2021. Владимир: Изд-во ВлГУ, 2022. С. 174.
2. Марчук В.Н., Григорьевский В.И. // Тез. докл. Всерос. науч. конф. "Современные проблемы дистанционного зондирования, радиолокации, распространения и дифракции волн". Муром. 25–27 мая 2021. Владимир: Изд-во ВлГУ, 2022. С. 2015.
3. Vergnano A., Franco D., Godio A. // Remote Sensing. 2022. V. 14. № 7. P. 1763.
4. Крутских Н.В., Кравченко И.Ю. // Совр. проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2018. Т. 15. № 2. С. 159.
5. Терехов А.Г., Абаев Н.Н., Юничева Н.Р. // Совр. проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2019. Т. 16. № 5. С. 351.
6. Аджиев А.Х., Андриевская В.Ю., Багов Э.Д. Способ дистанционного определения толщины снежного покрова в лавинных очагах // Патент РФ № 2454651. Оpubл. офиц. бюл. "Изобретения. Полезные модели" № 18 от 27.06.2012.
7. Аджиев А.Х., Байсиев Х.Х., Тапасханов и др. Способ определения толщины снежного покрова в лавинных очагах // Патент РФ № 2547000. Оpubл. офиц. бюл. "Изобретения. Полезные модели" № 10 от 10.04.2015.