

Улучшение цифровой модели рельефа за счет полной волновой картины, полученной при лазерном сканировании

Andreas Ullrich^a, Nikolaus Studnicka^a, Markus Hollaus^b, Christian Briese^b, Wolfgang Wagner^b,
Michael Doneus^c, и Werner Mücke^b

РИГЛ Лазер Межемент Системс ГмбХ (^aRIEGL Laser Measurement Systems GmbH), Австрия;
Лаборатория Кристиана Допплера “Пространственные данные, полученные при лазерном сканировании и дистанционных измерениях” в институте Фотограмметрии и дистанционных измерений, Венский Технологический Университет, Австрия;
Кафедра доисторической эпох и ранней истории Венского Университета, Австрия;

ОБЗОР

По сравнению с лазерными радарными системами на основе обычного дискретного эхо-подхода, лазерные радарные системы прямого обнаружения с оцифровкой эхосигнала и последующим полным волновым анализом, как например *RIEGL LMS-Q560*, предоставляют дополнительную информацию о свойствах цели. Эта дополнительная информация может использоваться в процессе задач обработки при разбиении данных измерений на отражения от земной поверхности или наземных предметов и отражение не от земной поверхности. Классификация является предпосылкой построения высококачественных цифровых моделей рельефа местности (DTM) на основе данных лазерной бортовой аэрофотосъемки. Мы представляем данные, демонстрирующие превосходство записи полной формы сигнала по сравнению с обычными данными, полученными с помощью лазера для построения цифровых моделей рельефа местности.

Ключевые слова: Лазерный локаатор, лидар, лазерная бортовая система аэрофотосъемки, анализ полного волнового сигнала, цифровые модели рельефа местности

1. ИНСТРУКЦИЯ

Термин лазерная бортовая система аэрофотосъемки (ALS) описывает широко используемый в настоящее время метод измерения, который служит для получения трехмерных данных о поверхности земли. Обычно лазерная бортовая система аэрофотосъемки установлена на воздушном судне и сканирует поверхность земли, измеряя время пробега импульса от лазерного сканнера до поверхности земли и обратно. Система лазерных измерений также называется системой ЛИДАР (лазерная система обнаружения и измерения дальности). Для получения точных данных в установленной глобальной координатной сетке (например, WGS84), ориентация и положение системы ЛИДАР должна вычисляться с большой точностью. Таким образом один из основных компонентов системы лазерной бортовой системы аэрофотосъемки - это встроенное инерционное измерительное устройство (IMU) и глобальная система позиционирования (GNSS, разновидность GPS) тесно связанная с системой сканирования ЛИДАР, в зависимости от пространственного положения и позиции системы ЛИДАР. Обладая технологическими преимуществами лазерного сканирования, глобальной спутниковой навигационной системы, инерционных измерительных устройств и самолетов лазерная бортовая система аэрофотосъемки приобрела большое значение в экономике благодаря высокой точности и считается стандартным методом получения топографических данных. Лазерная бортовая система аэрофотосъемки имеет широкий диапазон использования от получения цифровых моделей рельефа местности до

трехмерных моделей городов и растительности (например, параметров лесов) или коридорное картографирование (например, линий электропередачи).

Системы ЛИДАР, основанные на принципе импульсного принципа полетного времени, способны предоставить более одного отсчета дальности на лазерный импульс, если несколько объектов попадают в зону действия лазерного луча. Обычные дискретные системы лазерной бортовой аэрофотосъемки записывают, по крайней мере, первый или последний обнаруженный отраженный сигнал. Однако, большинство существующих систем позволяют отображать первый и последний отраженный сигнал, и лишь немногие системы могут получать до четырех отраженных сигналов от множественных целей, на которые направлен один лазерный луч. На выходе таких систем обычно появляется набор трехмерных координат и так называемая информация об интенсивности на обнаруженный отраженный сигнал. Однако, по причине неизвестных характеристик цели (размер, отражательная способность, сечение лазерного локатора), значения интенсивности редко используются в коммерческих целях для того, чтобы сделать вывод о характеристиках рассматриваемой цели. В отличие от этих дискретных систем лазерной бортовой аэрофотосъемки, системы, основанные на оцифровке отраженного сигнала и последующем анализе полной волновой картины предлагают больше информации на один лазерный импульс и могут отобразить различные характеристики рассматриваемых целей.

Почти во всех применениях обработки данных систем лазерной бортовой аэрофотосъемки, особенно для построения цифровых моделей рельефа местности требуется разделение на наземные и точки, лежащие вне земли. Обычно для этого используются различные методы наложения фильтра, [1] при которых облако точек классифицируется как наземные точки и точки, находящиеся на некотором расстоянии от земли, на основе геометрических и топологических отношений между трехмерными данными [2]. Однако, если имеется несколько распределенных в пространстве целей внутри следа лазерного луча, что обычно характерно для покрытых лесом территорий, только часть энергии лазера отражается верхней частью лесного покрова, а оставшаяся энергия может пройти через небольшие щели и отражается от веток, кустарника или от земли. В этом случае отраженный сигнал является суперпозицией отдельных отраженных сигналов от различных препятствий. Для успешного разграничения двух соседних целей по следу импульса требуется минимальное расстояние, относящееся к так называемой разрешающей способности по дальности. Способность разграничения соседних целей зависит от параметров системы, например, длительности импульса, полоса пропускания системы, а также от обнаружения сигнала и схем обработки сигнала, применяемых в системе ЛИДАР.

Как указано в [3] и [4] данные полной волновой картины, по сравнению с обычными дискретными данными систем лазерной бортовой аэрофотосъемки, имеют то преимущество, что пользователи могут применять собственный метод обнаружения отраженного сигнала при последующей обработке. Это делает процесс определения расстояния более понятным и дает более высокую точность полученных расстояний. Помимо большей точности измерения расстояний, данные полной волновой картины позволяют извлечь видимые физические объекты из числа элементов отражающей поверхности. используя метод разложения Гаусса [5] дальность, полоса отраженного импульса и амплитуда могут определяться для каждого обнаруженного отраженного сигнала и, наконец, может быть вычислена эффективная площадь отражения. Первое исследование показало высокий потенциал этих дополнительных физических параметров для улучшенной классификации объекта [6, 7] что можно использовать для улучшенной классификации точек данных систем лазерной бортовой аэрофотосъемки на поверхности земли и точек, находящихся на некотором расстоянии от земли, которая позволяет получить цифровые модели рельефа местности более высокого качества [8, 9].

В следующих разделах приводится краткое описание систем лазерной бортовой аэрофотосъемки с оцифровкой отраженного сигнала (*RIEGL LMS-Q560*), анализа полной волновой картины на основе разложения Гаусса и построения цифровой модели рельефа, использующей дополнительную информацию, полученную с помощью анализа полной волновой картины в целях предварительной классификации точек и построения цифровой модели рельефа высокого качества. Улучшенные результаты относительно стандартных данных и стандартной обработки показаны на примере.

2. СИСТЕМА ПОЛУЧЕНИЯ ПОЛНОЙ ВОЛНОВОЙ КАРТИНЫ

Рисунок 1 на рисунке 1 показан процесс оцифровки отраженного сигнала. Верхняя линия показывает аналоговые отраженные сигналы: первый (самый левый) импульс относится к импульсу лазерного передатчика, а следующие импульсы относятся к отраженным сигналам от объектов внутри лазерного луча. Временное расстояние сигналов относительно импульса передатчика соответствует дальности. Последний сигнал относится к наиболее дальней цели, от которой поступил обнаруженный отраженный сигнал. Этот аналоговый отраженный сигнал отбирается с постоянными временными интервалами (средняя линия) и затем оцифровывается, при этом получается поток цифровых данных (нижняя линия сектора приема). Так же снимается частота следования лазерных импульсов, соответствующая длине селекторного импульса дальности, а именно, максимальному четкому обнаруженному расстоянию. В этом случае, скорость данных, полученных при цифровом преобразовании отраженного сигнала, очень велика, обычно 2 гигабайта в секунду. Для получения требуемой скорости подачи данных объем данных сокращается с помощью пороговой обработки. Таким образом, только на устройство записи данных для последующего автономного анализа передаются только выборочные данные, которые содержат сведения об обнаруженных целях.

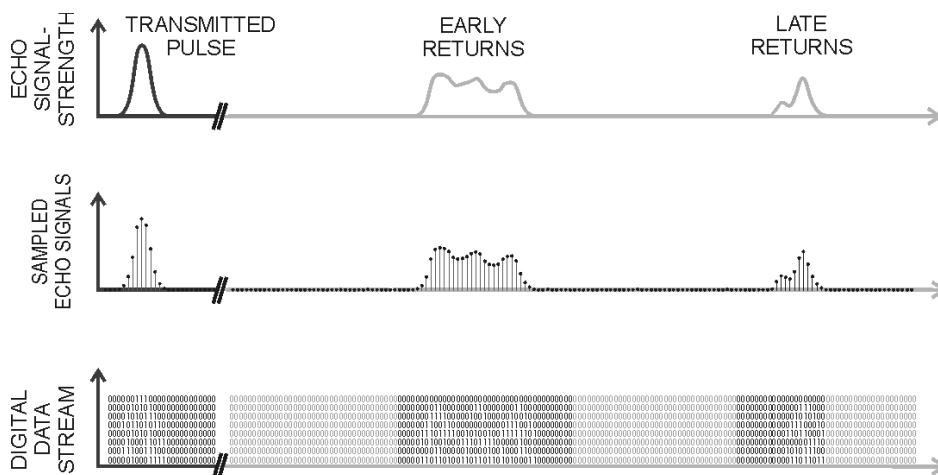


Рисунок 1. Принцип цифрового преобразования отраженного сигнала.

На этапе последующей обработки сигнал преобразуется в автономном режиме и подробно анализируется с помощью определенных алгоритмов, например, сопоставляя соответствующий опорный сигнал передаваемой формы с отраженным сигналом, таким как импульсы Гаусса в виде колокола, упомянутые ниже. Временное положение цели относительно импульса передатчика соответствует дальности. Временное расстояние между отраженными импульсами дает очень точную информацию о расстоянии между объектами. Информация о длительности отраженного импульса дает информацию о неровности поверхности, наклоне цели, глубине объемной цели, а именно о слое тумана. Амплитуда

отраженного сигнала дает информацию о сечении лазерного локатора или непосредственно об отражательной способности цели в случае, если цели больше, чем контур диаграммы направленности лазера.

Для съемки основными преимуществами цифрового преобразования отраженного сигнала вместе с анализом полной волновой картины в автономном режиме являются: доступ к неограниченному числу целей на лазерное измерение, прекрасная разрешающая способность импульсов, информация о неровности поверхности и/или уклоне поверхности и основательная оценка сечения лазерного локатора обнаруженных целей.

Серийно выпускаемая бортовая лазерная локационная система предназначена для лазерного сканирования с оцифровкой отраженного сигнала, *RIEGL LMS-Q560* [10] и устройство записи данных *RIEGL DR560 / DR560-RD*, показана на рисунке 2 Рисунок2.

Лазерное устройство направляет свой измерительный луч продольно в конфигурируемом широком поле обзора. Сочетание результатов лазерного сканнера и IMU/GPS (инерционная система измерения/ глобальная система определения местоположения) в современной бортовой системе ЛИДАР для построения отображений. Высокая скорость измерения и сканирования обеспечивает прекрасную плотность измерений на земной поверхности с равномерным распределением зон охвата лазера на земной поверхности. Инструмент очень компактный и достаточно легкий для установки в маленьких одномоторных самолетах, вертолетах или даже сверхлегких самолетах. Таблица1 в таблице 1 приводятся основные технические характеристики лазерного сканнера.

Для бортового лазерного сканнера система должна быть дополнена, по крайней мере, подсистемой INS/GPS, которая механически присоединяется к лазерному сканнеру, и компьютерной подсистемой для контроля системы и хранения исходных данных для дальнейшей обработки. Во многих случаях средняя цифровая камера предоставляет дополнительные данные, например, ортофотоснимки. В качестве примера на Рисунок3 показана серийная бортовая система лазерного сканирования на основе двух *RIEGL LMS-Q560*, которая базируется на самолете, произведенном Diamond Airborne Sensing, и многофункциональной платформе DA42 MPP. Параметры системы обобщаются в Таблица2.



Рисунок2. RIEGL LMS-Q560 (верх)
и
RIEGL DR560 (низ).

Параметр	Значение
Диапазон измерений	30 м - 1800 м при отражательной способности цели 60% 30 м - 1200 м при отражательной способности цели 20%
Точность измерения расстояний	20 мм
отражательная способность при обнаружении групповой цели	до 0,5 м
Скорость измерений	240 000 измерений/ с (быстрая скорость передачи) до 160 000 измерений/ с (средняя скорость)
Диапазон сканирования	45° (до 60°)
Скорость сканирования	до 160 линий/ сек
Синхронизация	GPS PPS (импульсов в секунду) и серийный интерфейс
Временная отметка	разрешение 1 миллисек, диапазон однозначного измерения дальности > 1 неделя
Размер / вес	560 x 200 x 217 мм / 20 кг
Надежность лазера	лазер класс 1 / длина волны примерно соответствует инфракрасной

Таблица1. Основные технические характеристики
RIEGL LMS-Q560.



Рисунок3: Бортовая система лазерного сканирования на основе двух RIEGL LMS-Q560 и Diamond Airborne Sensing DA42 MPP.

самолет	Diamond DA42 MPP	
скорость самолета	40 м/с -80 м/с	
лазерный сканнер	RIEGL LMS-Q560, возможности получения полной волновой картины	
пространственная плотность, 45 м/с (2 лазерных сканнера)	AGL = 450 м	AGL = 800 м
при 2 x 100 кГц частота повторения импульсов	6 измерений/м ²	3,4 измерений/м ²
при 2 x 240 kHz частота повторения импульсов	14 измерений/м ²	--
объем памяти	> 8 часов записи данных полной волновой картины	
Точность измерения расстояний	2 см	
точность	10 см экспериментальные данные: менее 3 см (1с) относительно эталонных объектов после последующей обработки с изменением профиля аэрометода	
разрешения	сертификация категории EASA часть 23 (Еurope), FAR23 (США) позволяет работать по всему миру	

Таблица2: Параметры системы RIEGL/Diamond ALS.

3. ОБРАБОТКА ДАННЫХ

3.1 Испытательная площадка и данные испытаний

Испытательная площадка расположена в пределах горного хребта Лейта в 50 километрах от Вены. Центральная часть горного хребта Лейта покрыта лесами, основные породы дуб и бук с подлеском разной густоты. В пограничных областях имеются сельскохозяйственные угодья и несколько зданий. По всей территории с помощью бортового лазерного сканнера LMS-Q560 фирмы RIEGL, которым распоряжается компания Milan Flug GmbH, получены данные полной волновой картины. Данные были получены между 28 марта и 12 апреля 2007. Средняя высота полета составляла 600 м над землей, что привело к возникновению зоны расположения целей лазерного луча 30 см от земли. Плотность точек (например последние отраженные сигналы) составляет от 5 до 7 точек на м². Технические параметры для LMS-Q560 обобщаются в Таблице 1.

3.2 Обработка данных полной волновой картины

Согласно[5] волновая картина системы RIEGL LMS-Q560 хорошо описывается функцией Гаусса. Следовательно, полученная волновая картина с обратным рассеянием является результатом свертки волновой картины системы и дифференциального сечения поверхности

исследуемого объекта. Сложная волновая картина, состоящая из нескольких целей с обратным рассеянием моделируется с помощью следующей формулы:

$$P_r(t) = \sum_{i=1}^N \hat{P}_i e^{-\frac{(t-t_i)^2}{2s_{p,i}^2}} \quad (1)$$

где $P_r(t)$ - это полученная энергия, t_i - время прохождения сигнала в обоих направлениях для цели i , \hat{P}_i амплитуда цели i , $s_{p,i}$ - стандартное отклонение отраженного импульса от цели i , и N - число целей в пределах следа от лазерного импульса [5]. На основе этого разложения Гаусса получены диапазон каждого обнаруженного отраженного сигнала, амплитуда и длительность отраженного импульса. Из-за малой длительности импульса могут быть дифференцированы рассеивающие мишени LMS-Q560 ($\tau = 4$ нс), которые разделены минимальным расстоянием 0,6 м. Как показано на [5] уравнение дальности действия радиолокатора может быть преобразовано для принимаемой мощности P_r в эффективную площадь отражения σ , которая является калиброванной физической величиной. Полезная площадь пересечения лазерного луча и цели, с учетом направленности и силы отражения. Таким образом, описывается, какое количество энергии входящей электромагнитной волны рассеивается назад от цели. Для каждого обнаруженного отраженного сигнала σ_i можно вычислить с помощью следующего равенства:

$$\sigma_i = C_{cal} R_i^4 \hat{P}_i s_{p,i} \quad (2)$$

где C_{cal} - константа калибровки, а R_i - дальность до цели i . Для калибровки данных асфальтовые дороги используются в качестве эталонных целей. Предполагается, что средняя отражающая способность асфальтовых дорог составляет 0,2 и они ведут себя как идеальный рассеиватель Ламберта[5]. Кроме того, предполагается, что потеря мощности устройства и атмосфера соответствуют используемым данным. В соответствии с исследованиями[6] σ_i значения отдельных отраженных импульсов сильно зависят от числа отраженных сигналов от обратного рассеяния в пределах зоны охвата лазера. Таким образом, общее поперечное сечение обратного рассеивания σ_t , соответствующее суммарной энергии обратного рассеивания для каждого излучаемого импульса лазера рассчитывается по следующей формуле:

$$\sigma_t = \sum_{i=1}^N \sigma_i \quad (3)$$

Полученные величины проиллюстрированы на рисунке Рисунок4. На рисунке Рисунок4b представлены амплитуды, зависящие от коэффициента отражения цели, при числе отраженных сигналов на один лазерный импульс и в диапазоне между лазерным сканером и целью. На рисунке Рисунок4d представлено полное поперечное сечение обратного рассеивания, которое не зависит от диапазона и числа отраженных сигналов на лазерный импульс. Можно увидеть, что лазерные импульсы, включающие также сигнал, обратно отраженный от поверхности, характеризуются более высоким σ_t , чем лазерные импульсы, содержащие лишь сигналы, обратно отраженные от точек вне земной поверхности (например, растительность). Ширина отраженного сигнала соответствует распределению в диапазоне всех отдельных отраженных элементов, формирующих один отраженный сигнал. Как следствие ширина отраженного сигнала представляется достаточно узкой при открытом рельефе местности и увеличивается в случае сигналов, отраженных обратно от более грубых поверхностей (например, лесного покрова, кустов, травы и т.д.). Как показано на рисунке Рисунок4с зоны с гладкой или более грубой поверхностью могут быть легко различимы на изображении по ширине отраженного сигнала. Даже в случае полей, покрытых травой и злаками (высота растительного покрова прилб. 30 см) существует четкое различие по

ширине отраженного сигнала, как это можно увидеть в случае двух полей в верхнем и нижнем правом углу рисунка Рисунок4с.

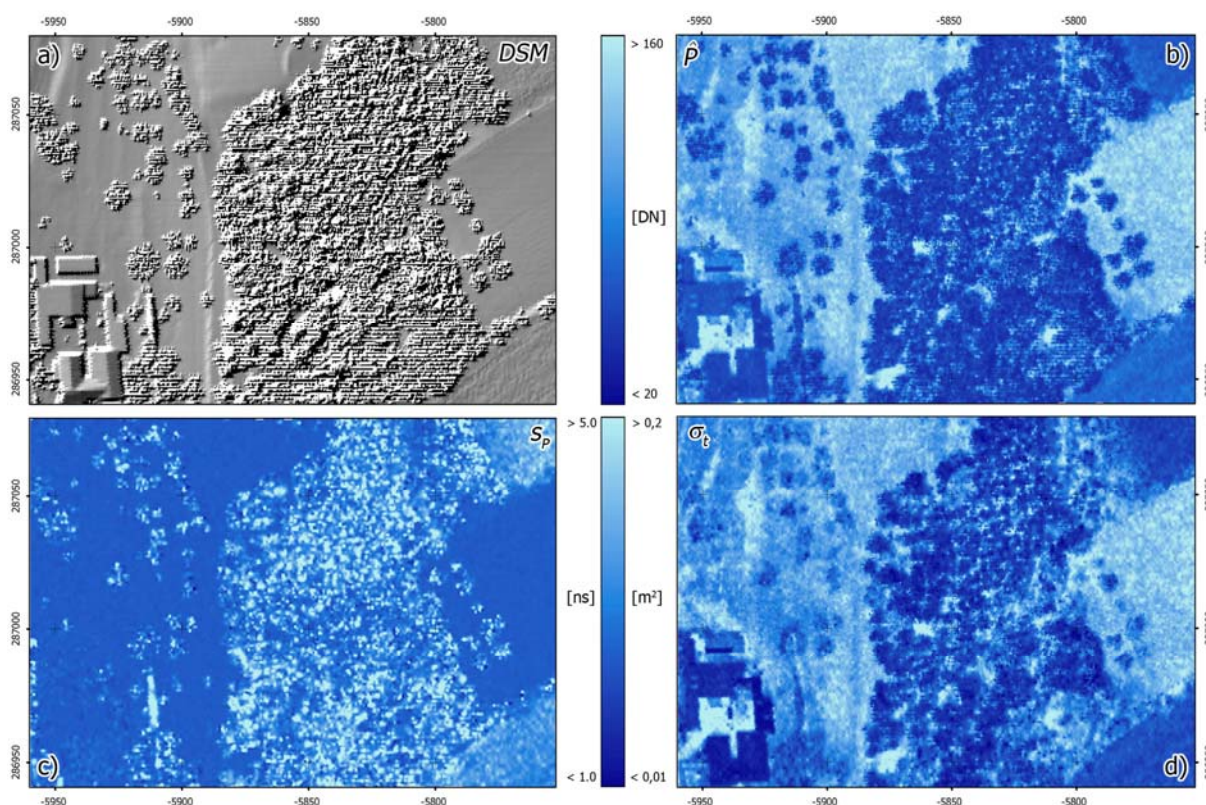


Рисунок4. Физические величины, полученные на основе данных воздушного лазерного сканирования с использованием полной формы волны. Представлены (а) затененная цифровая модель поверхности, (b) амплитуды, (c) различные величины ширины отраженного сигнала, и (d) общее поперечное сечение обратного рассеивания, соответствующее положению последнего отраженного сигнала.

4. УЛУЧШЕННАЯ ГЕНЕРАЦИЯ ЦИФРОВЫХ МОДЕЛЕЙ ПОВЕРХНОСТИ

Генерация ЦМП (цифровых моделей поверхности) из данных ВЛС (воздушного лазерного сканирования) требует разделение (классификацию) облака точек на точки поверхности и точки, лежащие вне поверхности. В прошлом были разработаны многочисленные алгоритмы наложения фильтра [1]. Все эти подходы схожи тем, что они опираются только на геометрические критерии (напр. Отношение высоты к соседним точкам) для устранения точек, лежащих вне поверхности. Для анализа и генерации ЦМП в настоящее время используется техника иерархического робастного наложения фильтра. Процедура грубого наложения фильтра была представлена в [11], и она в основном базируется на допущении, что низко лежащие облака точек в виде кластеров более вероятно относятся к поверхности по сравнению с более высоко лежащими точками. Расширение этой техники в иерархическую структуру детально описано в [12]. Процедура иерархической грубой фильтрации представлена в пакете программ SCOP++¹.

Для обсуждения информации, извлеченной из данных картины на основе полной формы сигнала ВЛС [6, 13, 14] использовалась ширина отраженного сигнала для предварительной классификации последних отраженных сигналов в наземные точки и точки, лежащие вне поверхности. В дополнение к ширине отраженного сигнала может использоваться

¹ <http://www.ipf.tuwien.ac.at/products>; <http://www.inpho.de>

эффективная площадь обратного отражения для предварительной классификации последних отраженных сигналов. На рисунке 5 Рисунок5 показаны предварительно классифицированные точки, лежащие вне поверхности, с учетом того, что были применены простые пороговые значения для ширины отраженного сигнала и учитывалась эффективная площадь обратного отражения. Наконец, предварительно классифицированные наземные точки могут быть использованы для моделирования ЦМП.

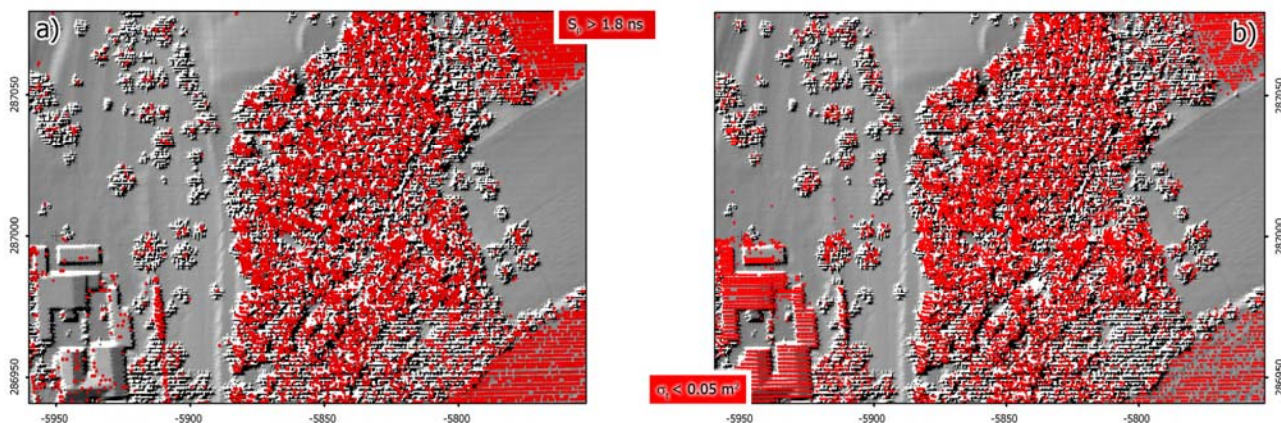


Рисунок5. Цифровые модели поверхности перекрывающиеся с предварительно классифицированными точками, лежащими вне поверхности. Для классификации был применен метод пороговых значений для ширины отраженного сигнала (a) и эффективная площадь обратного отражения (b).

Однако данный подход надо использовать с осторожностью, поскольку он не может исправить неизбежные ошибки предварительной классификации. Поэтому в [9] метод иерархической робастной фильтрации был расширен до использования отдельных заранее заданных величин всех последних отраженных сигналов. Наземные точки обычно характеризуются малой шириной отраженного сигнала, в отличие от точек, лежащих вне поверхности, у которых отраженный сигнал шире, что продемонстрировано на Рисунок Рисунок4с. Таким образом, малые значения отраженного сигнала приписываются к высоким заранее заданным весовым коэффициентам, и наоборот. Вместо ширины отраженного сигнала также может быть использована эффективная площадь обратного отражения для оценки заранее заданного весового коэффициента. Следовательно, геометрические и физические свойства отслеживаемых отраженных сигналов могут быть использованы для грубой оценки поверхности. Рисунок 6b иллюстрирует улучшения ЦМП при помощи извлечения ширины отраженного сигнала из данных ВЛС на основе полной формы сигнала. Для районов, покрытых низкорослой растительностью установленные заранее отдельные весовые коэффициенты приводят к наиболее надежным ЦМП.

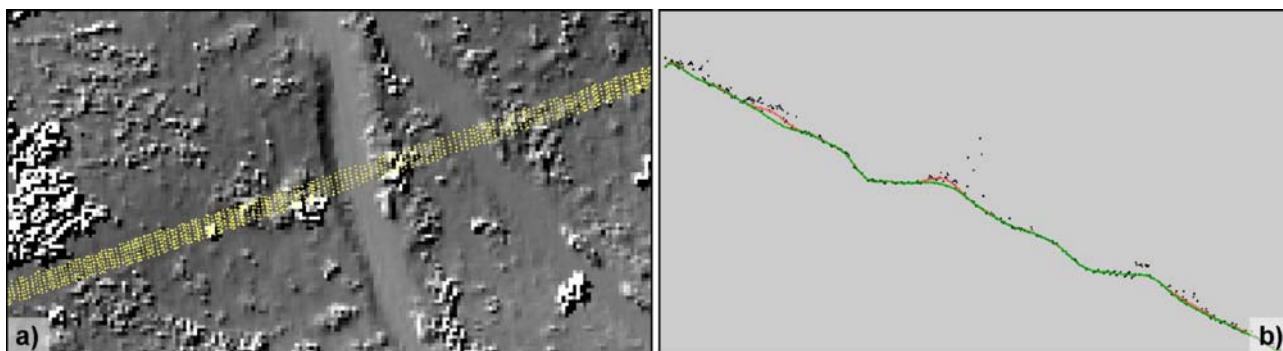


Рисунок 6. a) Перекрывающаяся цифровая модель поверхности с последними отраженными сигналами, показанными на b. b) Цифровые модели поверхности, сгенерированные грубой оценкой (зеленая линия) или без (красная линия) отдельными заранее заданными весовыми коэффициентами.

Отдельные весовые коэффициенты основаны на ширине отраженного сигнала. Последние точки отраженного сигнала показаны черными точками.

5. 1. КРАТКИЕ ВЫВОДЫ И ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Данная статья предлагает обзор по авиационной цифровой лазерной сканирующей системе и анализу на основе полной формы сигнала и демонстрирует использование данных на основе полной формы сигнала для генерации цифровых моделей поверхности с повышенной точностью. Улучшения возможны за счет дополнительно возможных наблюдений за каждым целевым отраженным сигналом, а именно ширина отраженного сигнала и оценка общей эффективной площади обратного отражения для каждого импульса лазера. Для иерархического метода грубой фильтрации использовались индивидуальные заранее заданные силы импульса, которые были получены из данных о ширине отраженного сигнала. Наконец, может быть показано, что ЦМП, сгенерированные из последних отраженных сигналов с учетом ширины отраженного сигнала, обладают более высоким качеством, чем те, которые сделаны без учета ширины отраженного сигнала. Для районов, поросших лесом, небольшие артефакты, вызванные наличием кустарника, подлеска или бурелома, с успехом могут быть устранены, что не было бы возможным в автоматическом цепном процессе, когда использовались только трехмерные координаты. Еще большие успехи в построении ЦМП могут быть достигнуты на сельскохозяйственных угодьях, покрытых высокой плотной травой или злаковыми культурами. Преимущество лазерного сканирования на основе полной формы сигнала, таким образом, открывает новые возможности для, например, археологической разведки под покровом леса путем более точного построения модели поверхности.

ВЫРАЖЕНИЕ БЛАГОДАРНОСТИ

Данные ВЛС любезно предоставлены Майклом Донеусом, Отдел Изучения Доисторического времени и Ранней Истории, Венский Университет, взяты из проекта, организованного на средства Австрийским Фондом Наук (FWF – номер проекта P18674-G02). В заключение, мы бы хотели поблагодарить Гельмута Кагера из Института Фотограмметрии и дистанционных измерений (I.P.F.), Технический Университет Вены, и Томаса Мельцера из Лаборатории Кристиана Допплера по изучению пространственных данных, полученных при помощи лазерного сканирования и дистанционных измерений в I.P.F. за их помощь в обработке данных.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Sithole, G.; Vosselman, G. Experimental comparison of filter algorithms for bare-Earth extraction from airborne laser scanning point clouds [Экспериментальное сравнение алгоритмов наложения фильтра для извлечения чистой Земли из облаков точек воздушного лазерного сканирования], *ISPRS Журнал по фотограмметрии и дистанционным измерениям*. **2004**, 59(1-2), 85-101.
2. Pfeifer, N.; Gorte, B.; Elberink, S. O. Influences of Vegetation on Laser Altimetry - Analysis and Correction Approaches [Влияние растительности на измерение высоты лазером - Подходы к анализу и корректировке], *Материалы семинара ISPRS "Лазерные сканеры для оценки лесов и пейзажей"*, Фрайбург, Германия, **2004**, XXXVI, Часть 8/W2, 283-287.
3. Wagner, W.; Ullrich, A.; Melzer, T.; Briese, C.; Kraus, K. From single-pulse to full-waveform airborne laser scanners: Potential and practical challenges [От от воздушных лазерных сканеров на основе отдельных импульсов к полноволновым сканерам: Возможные и

- практические задачи], *Материалы XX конгресса Международного общества по фотограмметрии и дистанционным измерениям, том XXXV, Часть В/3, 12-23 июля 2004, комитет 3*, Стамбул, Турция, **2004**, том XXXV, часть В3, 6.
4. Ullrich, A.; Reichert, R. High resolution laser scanner with waveform digitization for subsequent full waveform analysis [Лазерные сканеры высокого разрешения с оцифровкой формы сигнала для последующего анализа на основе полной формы сигнала], *Материалы SPIE - Лазерная радарная технология и области ее применения X*, **2005**, 5791, 82-88.
 5. Wagner, W.; Ullrich, A.; Ducic, V.; Melzer, T.; Studnicka, N. Gaussian decomposition and calibration of a novel small-footprint full-waveform digitising airborne laser scanner [Разложение по Гауссу и калибровка не существовавших ранее малоформатных цифровых воздушных лазерных сканеров, работающих с полной формой сигнала], *ISPRS Журнал по фотограмметрии и дистанционным измерениям*. **2006**, 60(2), 100-112.
 6. Wagner, W.; Hollaus, M.; Briese, C.; Ducic, V. 3D vegetation mapping using small-footprint full-waveform airborne laser scanners [Пространственное нанесение на карту растительности при помощи малоформатных цифровых воздушных лазерных сканеров, работающих с полной формой сигнала], *Международный журнал по дистанционным измерениям*. **2007**, в печати.
 7. Hug, C.; Ullrich, A.; Grimm, A. Litemapper-5600 - Цифровая система для составления карт растительности и рельефа на основе полной формы сигнала LiDAR, *Международные архивы фотограмметрии, дистанционных измерений и наук о пространственной информации*. **2004**, XXXVI, ЧАСТЬ 8/W2.
 8. Doneus, M.; Briese, C. Digital terrain modelling for archaeological interpretation within forested areas using full-waveform laserscanning [Цифровое моделирование рельефа для археологических толкований в лесных зонах при помощи лазерного сканирования на основе полной формы сигнала], *Международный семинар CIPA, Никосия, Кипр; 10-30-2006 - 11-04-2006; в: "VAST 2006", M. Ioannides, D. Arnold, F Niccolucci, K. Mania (ред.); 7-ой Международный симпозиум виртуальной реальности, археологии и культурного наследия VAST (2006)*. **2006**, 155 - 162.
 9. Mandlbürger, G.; Briese, C.; Pfeifer, N. Progress in LiDAR sensor technology - chance and challenge for DTM generation and data administration [Усовершенствование сенсорной техники LiDAR - возможности и задачи при генерации цифровых моделей поверхности и администрировании данных], *Материалы 51-ой фотограмметрической недели, 09-03-2007 - 09-07-2007*, Штуттгарт, **2007**, 159-169.
 10. RIEGL Laser Measurement Systems GmbH. Технические характеристики на www.riegl.com, 2007.
 11. Kraus, K.; Pfeifer, N. Determination of terrain models in wooded areas with airborne laser scanner data [Создание моделей рельефа в лесных зонах на основе данных воздушного лазерного сканирования], *ISPRS Журнал по фотограмметрии и дистанционным измерениям*. **1998**, 53(4), 193-203.
 12. Briese, C.; Pfeifer, N.; Dorninger, P. Applications of the Robust Interpolation for DTM Determination [Области применения робастной интерполяции при создании цифровых моделей поверхности], *Международные архивы фотограмметрии и дистанционных измерений*. **2002**, XXXIV (Часть 3A), 55-61.
 13. Doneus, M.; Briese, C. Full-waveform airborne laser scanning as a tool for archaeological reconnaissance [Полноволновое воздушное лазерное сканирование в качестве инструмента археологической разведки], в: *"From Space to Place". Материалы 2-ой Международной конференции по дистанционным измерениям в археологии, Международная серия BAR, 1568*. **2006**, 99-105.
 14. Ullrich, A.; Hollaus, M.; Briese, C.; Wagner, W.; Doneus, M. Utilization of full-waveform data in airborne laser scanning applications [Использование полноволновых данных в

приложениях для воздушного лазерного сканирования], *Материалы конференции Симпозиум по обороне и безопасности SPIE, том 6550, 9 - 13 апреля 2007, Орландо, Флорида США, 2007*, стр. 12.