

ТЕКУЩИЕ И ПЕРСПЕКТИВНЫЕ МЕТОДЫ ДИСТАНЦИОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ, ИСПОЛЬЗУЕМЫЕ В ЛЕСНОМ ХОЗЯЙСТВЕ ШВЕЦИИ¹

Håkan Olsson², Mikael Egberth, Jonas Engberg, Johan E.S. Fransson, Tina Granqvist Pahlén,

**Olle Hagner, Johan Holmgren, Steve Joyce, Mattias Magnusson, Björn Nilsson,
Mats Nilsson, Kenneth Olofsson, Heather Reese, Jörgen Wallerman**

Автореферат. Дистанционное зондирование Земли эффективно используется шведскими руководящими органами в таких областях, как, например, выявление сплошных рубок, оценка параметров насаждений (с использованием автоматической классификации kNN) и выделение однородных групп насаждений (с привлечением наземных данных пробных площадей NFI). Для планирования лесопользования в частных лесах используется дешифрирование аэрофотоснимков в сочетании с натурным обследованием лесонасаждений. Автоматизированный анализ цифровых аэрофотоснимков является перспективным методом классификации лесов по породному составу. Лазерное сканирование применяется для оценки высоты деревьев, оценки запаса стволов и оценки распределения деревьев по размеру, а низкочастотный радар используется для оценки запаса стволов. Регулярное получение снимков отдельных насаждений с помощью небольших беспилотных самолетов также становится все более и более доступным.

Введение

В Швеции площадь лесов, используемых для производства лесоматериалов и балансовой древесины, составляет 22.9 миллиона га. Половина этих лесов принадлежит нескольким крупным компаниям, а вторая половина поделена на более чем 200 000 частных владений. Информация по всем этим лесным ресурсам востребована на нескольких уровнях: 1) руководящим органам нужна сводная информация по всем лесовладельцам; 2) владельцам требуется более подробная информация по их лесам для составления планов ведения лесного хозяйства; 3) на уровне насаждений регулярно требуется информация по тем участкам леса, где планируется проведение рубок или же рубки были недавно проведены. В настоящее время новые методы дистанционного зондирования внедряются и испытываются на всех трех уровнях. Цель настоящей статьи – дать обзор современного состояния дел по внедрению в Швеции дистанционных методов оценки лесных ресурсов. Так как большая часть исследований по использованию дистанционных методов в лесном хозяйстве Швеции выполняется в Лаборатории дистанционного зондирования Шведского аграрного университета SLU, то параллельно мы постараемся дать обзор последних исследований Лаборатории по данной тематике и привести те ссылки на опубликованные работы, в которых можно найти дополнительную информацию по каждой теме.

Государственный мониторинг лесов с использованием спутниковых данных

Оптические спутниковые снимки среднего разрешения со спутников Landsat или SPOT в течение последних лет эффективно использовались Шведским агентством лесного хозяйства и Шведской государственной программой по инвентаризации лесов (NFI). С 1999 года Агентство лесного хозяйства ежегодно получало спутниковые снимки на всю территорию лесов Швеции. Важнейшей областью применения снимков является контроль использования выданных разрешений на рубку; с 2003 года по снимкам контролируются и границы лесосек на местности. Эта работа выполняется местными лесничими (в примерно 100 лесничествах) с помощью специально разработанной ГИС и программ по обработке снимков, которые были разработаны

¹) Представлено на Симпозиуме по лесоустройству и анализу, проведенного Лесной службой США, Портланд, США, октябрь 2005 года.

²) Профессор лаборатории дистанционного зондирования, факультет управления лесными ресурсами и геоматики, Шведский аграрный университет, SE 90183 Умео, Швеция. E-mail: hakan.olsson@resgeom.slu.se

Агентством лесного хозяйства и Шведской топографической службой. Анализ динамики (change detection) проводится с помощью относительно калиброванных снимков, где в качестве спектральных эталонов используются «лесные» пиксели. Для осуществления данного мониторингового проекта в течение последних лет осуществлялась ежегодная летняя съемка всей территории Швеции спутниками SPOT. Созданная в ходе работы по проекту база данных снимков может эффективно использоваться для решения и других задач лесного хозяйства – например, для оценки параметров насаждений путем совместного анализа снимков и данных наземных пробных площадей NFI.

Шведская государственная программа по инвентаризации лесов

Проект Шведской национальной программы по инвентаризации лесов (NFI) основывается на ежегодном систематическом описании полевых пробных площадей на всей территории Швеции (Ranneby et al., 1987, Ståhl 2004). Цель проекта заключается в том, чтобы собрать надежную статистику по 31 провинции (или по отдельным частям провинций), используя средние по пятилетиям итоги учетов на полевых пробных площадях. Пробные площади располагаются группами по сторонам квадрата; при этом каждая группа состоит либо из 6 (12) временных круговых площадок радиусом 7 м, либо из 8 постоянных круговых пробных площадей радиусом 10 м. Ежегодно в Швеции проводятся учеты примерно на 5300 постоянных и на 3500 временных пробных площадей. Постоянные пробные площади повторно обследуются раз в 5–10 лет. С 1996 г. координаты пробных площадей определяются с помощью GPS, что позволяет в дальнейшем совместно использовать характеристики насаждений и характеристики пикселей на спутниковых снимках.

Линейка программных продуктов Munin

Для того чтобы совместно использовать данные пробных площадей NFI и спутниковые данные Landsat была разработана линейка из нескольких программных продуктов. В качестве первого шага данные пробных площадей NFI используются для предварительной обработки спутниковых данных. Моделируются локальные геометрические погрешности между спутниковыми данными и каждой пробной площадью, после чего на основе модели выбираются наиболее вероятные значения пикселей (Hagner & Reese 2006). Кроме того, данные пробных площадей NFI и данные изображений совместно используются для определения параметров ортокоррекции и для компенсации дымки на изображениях (Hagner & Olsson, 2004).

Первым опытом применения программных продуктов Munin стала классификация всех лесных земель Швеции с выделением семи классов лесной растительности. Эта работа была проведена Шведским аграрным университетом (SLU) в 2002–2003 годах по контракту со Шведской топографической службой, а ее результаты были использованы для составления национальной шведской и европейской базы данных по типам земель (ландшафтам). Всего было использовано 50 кадров Landsat ETM+ и 34 000 пробных площадей NFI. Классификация лесов проводилась методом максимального правдоподобия с калибровкой, в котором использовались априорные вероятности. Классификация пикселей каждого кадра Landsat повторялась до тех пор, пока встречаемость каждого класса лесных земель на снимке не совпадала со встречаемостью того же класса на пробных площадях NFI для данного кадра (Hagner & Reese, 2006).

Продукт kNN (классификация методом ближайшего соседа)

Снимки Landsat ETM+ и пробные площади NFI, использованные для упомянутой выше классификации типов земель, были использованы также для создания государственной базы данных по лесам с использованием версии финского метода kNN – варианта метода ближайшего соседа (Tomppo, 1993, Reese et al., 2003). Первая база данных «kNN Швеция» была создана на основе серии снимков, датированных примерно 2000 годом. Эта база доступна в качестве растрового продукта с оценкой для каждого пикселя: общего запаса стволов, запаса стволов по породам, возраста насаждений и средней высоты деревьев. Расчет данных параметров был выполнен для всех пикселей, определенных как «лесные», в соответствии с топографической картой масштаба 1 : 1 000 000. С использованием данного программного

продукта создание такой базы данных для всех лесных земель Швеции требует временных затрат в примерно один человеко-год, включая обработку всех данных и проверку качества. Существует также версия базы данных kNN, где исходные данные генерализованы с помощью модуля сегментации собственной разработки (Hagner, 1990), чтобы отобразить близкие по характеристикам насаждения.

Тогда как точность kNN продукта на уровне пикселей может быть довольно низкой, точность на уровне агрегированных участков является вполне приемлемой для многих областей применения. Обычно точность оценки запаса стволов составляет порядка 60% на уровне пикселя, 40% на уровне насаждений и 15% для генерализованных участков размером более 100 га (Fazakas *et al.*, 1999, Reese *et al.*, 2002, Reese *et al.*, 2003). Так как корреляция между оптическими спутниковыми данными и запасом стволов в сомкнутых насаждениях – довольно низкая, метод классификации kNN занижает запас стволов в продуктивных насаждениях. Наоборот, запас стволов в изреженных или молодых лесах может быть переоценен.

База данных kNN используется органами лесного хозяйства и охраны окружающей среды, а также налоговым управлением для получения обзорных данных по лесным ресурсам на больших площадях (Nilsson *et al.*, 2004). Она также используется во многих исследовательских проектах, таких как моделирование местообитаний различных видов; в качестве исходных данных для моделирования динамики ландшафтов, и, кроме того (вместе с разновременными снимками), для анализа территорий, пострадавших от урагана. В 2006 году создается новая версия общенациональной базы данных kNN с использованием снимков спутника SPOT, датированных летом 2005 года.

Генерализация данных пробных площадей NFI

Генерализация (post-stratification) данных пробных площадей NFI в настоящее время используется как стандартная рабочая процедура. Результаты тестов показывают, что среднеквадратическую погрешность оценки запаса (общего запаса стволов, запаса для сосны, ели и лиственных пород, а также биомассы деревьев) можно снизить на уровне провинции путем генерализации данных с использованием снимков Landsat ETM+. При этом погрешность оценки снижается на 10–30% по сравнению с той погрешностью, что получается только по полевым данным (Nilsson *et al.*, 2003; Nilsson *et al.*, 2006). Генерализация данных зарекомендовала себя как исчерпывающий и эффективный метод сочетания спутниковых снимков и данных NFI. В результате применения данного метода устраняется большинство проблем, приводящих к необъективным оценкам, чего трудно достичь при использовании других подходов.

Планирование лесохозяйственных мероприятий с помощью бортовых датчиков

В Швеции планирование лесохозяйственных мероприятий на лесных участках находится в компетенции владельца земли. Поэтому в данном разделе обсуждаются методы дистанционного зондирования, которые позволяют оценить параметры конкретных насаждений и, соответственно, планировать в них мероприятия. Точность оценок разными методами наиболее важного параметра – запаса стволовой древесины – приводится также в таблице 1.

Оптические спутниковые данные с разрешением пикселя 5–30 м эффективно используются для обновления границ насаждений (выделов). Кроме того, при условии непрерывного поступления данных, они могут использоваться для других задач – таких как выявление насаждений, где необходима рубка кустарника. Тем не менее, спутниковые данные редко используют для планирования лесохозяйственных мероприятий, так как получаемые по космическим снимкам характеристики насаждений считаются недостаточно точными. Вместо космических снимков совместно используются дешифрирование аэрофотоснимков и наземные полевые работы. По традиции, фотоснимки используются, в основном, для выделения однородных выделов. Однако, особенно в случае крупных лесопромышленных холдингов, фотограмметрические методы используются и для измерения высоты деревьев, а также для оценки запаса стволов (вручную по снимку). Аэрофотосъемка континентальной территории Швеции является единственным в стране видом ДЗЗ, который осуществляется регулярно на государственные субсидии. За последние годы отсканированные цифровые ортофотоснимки

превратились в наиболее широко используемый источник данных для ежедневной работы в лесном хозяйстве. В 2004 году Шведская топографическая служба приобрела цифровую картографическую камеру компании Z/I. Как показывает опыт использования данной камеры, радиометрическое качество таких снимков гораздо выше качества сканированных аэрофотоснимков.

Автоматическое дешифрирование аэрофотоснимков

В наших исследованиях по автоматическому дешифрированию аэрофотоснимков, мы разработали и внедрили новую версию «метода эталонов» (template matching method), разработанного Ричардом Поллоком в Канаде (Pollock, 1996). Этот метод основан на создании синтетических шаблонов деревьев, которые затем анализируются с учетом возможных углов обзора и соответствующего освещения при различном положении на снимке. В дальнейшем шаблонные деревья сравниваются с потенциальными деревьями на снимке с помощью метода корреляции. С применением «метода эталонов» были проведены работы в хвойных лесах на юге Швеции, и оказалось, что можно выделить и позиционировать примерно две трети деревьев на снимке (Olofsson, 2002, Erikson & Olofsson, 2005). В дальнейшем, используя на цифровом фото яркости пикселей определенных пород (выявленные методом эталонов), мы на начальных этапах работы смогли разделить ель, сосну и лиственные деревья в 90% случаев всех выявленных деревьев (Olofsson *et al.*, 2006).

Лазерное сканирование

С 1991 года Лаборатория дистанционного зондирования (часто в сотрудничестве со Шведским агентством оборонных исследований – FOI) проводит работы по применению лазерного сканирования лесов (Nilsson, 1996). Разработаны два основных метода инвентаризации лесов, основанных на лазерном сканировании. С использованием лазерных данных низкой плотности регистрации (порядка 1 лазерный импульс / м²), можно выявить статистические зависимости между измерениями на полевых площадях и характеристиками данных, получаемых с лазера. Так, выявленные закономерности статистического распределения высот деревьев (в процентилях); можно затем использовать во всех насаждениях, где проводилось лазерное сканирование. Этот метод обеспечивает оценки запаса стволов со среднеквадратической погрешностью 10–15% (Næsset *et al.*, 2004; Holmgren, 2004). Коммерческое использование лазерных измерений для инвентаризации лесов впервые было осуществлено в Норвегии. Первое промышленное испытание в Швеции было проведено в 2003 году, когда с помощью лазера была обследована территория в 5000 га (Holmgren & Jonsson, 2004). Среднеквадратическая погрешность на уровне насаждений составила 14% для объема стволов, 5% для высоты деревьев и 9% для среднего диаметра.

Принципиально другой подход заключается в лазерном сканировании с плотностью, достаточной для получения множества лазерных импульсов на дерево – с целью определения отдельных деревьев, для чего требуется плотность порядка 5 импульсов на м² и более. В настоящее время такие данные, в основном, получают при проведении научных исследований с вертолета, но технические разработки, позволяющие получать данные лазерного датчика очень высокой плотности с воздушных судов с неподвижным крылом, представляют собой волне перспективный вариант для последующих обследований лесов в промышленном масштабе. Вкладом в эту разработку является развивающаяся технология использования видеопреобразователя, которая задействует многие элементы датчика для записи обратного сигнала с каждого выданного лазерного импульса (Steinvall, 2003). Одно из таких исследований было проведено в Швеции в лесу с преобладанием хвойных пород. С помощью лазерного датчика высокой плотности удалось выявить более чем 70% всех деревьев, что в сумме составило более 90% по запасу стволов. Высота деревьев и диаметр крон также определялись автоматически, причем оба показателя – с точностью 0.6 м (Persson *et al.*, 2002). Используя характеристики крон деревьев, автоматически получаемые из данных лазерного сканирования, нам также удалось разделить сосну и ель с точностью 95% (Holmgren & Persson, 2004). Наша текущая работа заключается в совместном использовании лазерных данных и оптических снимков для более точного определения пород деревьев. Лаборатория дистанционного

зондирования также работает над оценкой распределения стволов по диаметру с использованием лазерного датчика высокой плотности (Holmgren и Wallerman 2006) и над применением лазерных данных для сегментации насаждений на снимках.

Бортовой радар диапазона ОБЧ – система CARABAS

Шведское агентство оборонных исследований (FOI) и Ericsson Microwave Systems разработали систему CARABAS, которая представляет собой уникальный радар с синтезированной апертурой - PCA (Hellsten *et al.*, 1996). В настоящее время имеется лишь одна такая система, однако разработка новых систем для гражданского использования активно обсуждается. Так как CARABAS работает с радарными волнами 3– 15 м в диапазоне ОБЧ (VHF), сигнал радара проникает в лесной полог и отражается преимущественно от земли и стволов деревьев. Длительный опыт применения CARABAS в Швеции выявил хорошие возможности PCA ОБЧ-диапазона для определения запаса стволов в бореальных лесах. Обычно среднеквадратическая ошибка определения запасов составляет на уровне насаждений примерно 20%. По сравнению с оптической съемкой, никакого насыщения сигнала в насаждениях с высокой полнотой в шведских лесах не наблюдалось (см., например, Fransson *et al.*, 2000). Оптические спутниковые данные, тем не менее, лучше коррелируют запасами стволовой древесины при значениях запаса примерно до 100 м³ /га, по сравнению с данными, выдаваемыми системой CARABAS. Таким образом, наилучшие результаты были получены путем совместного использования двух этих источников данных, когда оценкам с оптических снимков давался больший вес при низких запасах, а данным CARABAS – при высоких запасах (табл. 1).

Было также показано, что поваленные ветром деревья, по сравнению с растущими деревьями часто обеспечивают более сильный обратный сигнал радара и другую его текстуру, что обычно позволяет выявить ветровальные стволы под пологом оставшихся растущих деревьев (Fransson *et al.*, 2002; Ulander *et al.*, 2005). В настоящее время картирование территории с помощью системы CARABAS проводится в южной части Швеции на территории в 15 000 км², пострадавшей от урагана. Цель этой работы – выявление ветровальных стволов, которые могут вызвать вспышку насекомых-вредителей.

Картирование насаждений с использованием беспилотных летательных аппаратов

Сплошная рубка в шведских лесах назначается примерно в 100-летнем возрасте. Крупные лесные компании перед рубкой проводят специальную инвентаризацию для создания базы данных, которую можно использовать для отбора и рубки в определенный момент именно тех насаждений, в которых нуждается отрасль. В настоящее время такие инвентаризации лесного фонда базируются полностью на полевых исследованиях, и существует потребность в разработке и использовании дополнительных – дистанционных методов. Кроме того, после проведения сплошной рубки необходимо обследовать территорию на предмет планирования лесовозобновления, а также для оформления природоохранных мероприятий. В дальнейшем также необходимо вести контроль за ходом возобновления молодых насаждений, а также определять время и место проведения рубок ухода. При разработке конкретных методик обследования общим требованием является то, что такие обследования должны проводиться в определенный момент времени в конкретных насаждениях, разбросанных по территории. Сегодня в Швеции фотоснимки свежих сплошных лесосек часто делаются с небольших самолетов с использованием среднеформатных цифровых фотоаппаратов. В будущем, вариантом, экономящим время и средства, может стать использование беспилотных летательных аппаратов (БПЛА) с камерами и/или другими датчиками, которые могут наводиться на цель самими лесничими. Члены нашей группы проводили эксперимент по разработке беспилотных летательных аппаратов, и, проведя серию испытаний, создали модель с размахом крыльев примерно 1.2 м и весом примерно 800 граммов. Она приводится в действие электродвигателем и может взять на борт полезную нагрузку весом более 500 граммов. Используя стандартную цифровую фотокамеру, с высоты примерно 150 м можно сделать серию фотоснимков с размером пикселя 5 см. В дальнейшем снимки можно триангулировать по участку и конвертировать в проекцию карты.

Обсуждение

Практическое использование спутниковых данных в Швеции предоставило новые возможности как для органов управления лесным хозяйством, так и для исследователей. Границы и даты проведения рубок главного пользования теперь хорошо документированы, а процесс лесовозобновления может эффективно контролироваться. Сочетание данных пробных площадей NFI и данных дистанционного спутникового зондирования позволило разработать первую общенациональную картографическую базу данных по лесным ресурсам. Стало возможным также получать достоверную статистику по территориям, размер которых меньше, чем территории, данные по которым рассчитываются путем обработки наземных данных площадей NFI. Наиболее серьезной проблемой, встающей на пути продолжения таких работ, является отсутствие четкого международного долгосрочного планирования в отношении получения необходимых спутниковых данных. Многие сканеры, которые могут заменить существующее поколение Landsat, позволяют получать только снимки максимальным размером порядка 60×60 км. Это затрудняет использование таких снимков, так как они покрывают гораздо меньше пробных площадей NFI, чем кадры Landsat. Более того, эти сканеры часто не имеют средне-инфракрасного диапазона, который очень важен для лесного хозяйства. К счастью, США приняли на себя обязательство разработать Landsat 8, но аналогичные обязательства требуются и от Европы.

Более дробное лесоустройство, необходимое для планирования лесохозяйственных мероприятий, проводится в Швеции на уровне отдельных лесных владений, и таким образом, оно пока редко согласуется с устройством соседних владений. Это в корне отличается от ситуации в Норвегии и Финляндии, где для обеспечения более согласованного картирования лесов применяются государственные субсидии. Так как аэрофотосъемка является единственным источником данных в рамках государственного планирования, реально для мелких лесовладельцев (владеющих половиной всех лесов Швеции) пока нет других вариантов получения данных об их лесах. Новые возможности в данном сегменте лесоустройства открываются в связи с появлением новых высококачественных цифровых снимков с цифровых обзорных камер. Такие снимки можно анализировать на новых, удобных для пользователя, фотограмметрических рабочих станциях, используя новые возможности автоматического дешифрирования аэрофотоснимков. Крупные лесные компании, которые управляют миллионами гектаров, могут использовать и другие методы дистанционного зондирования. Привлекательным дополнением к аэрофотоснимкам для них может стать лазерное сканирование. Для больших площадей стоимость получения данных лазерного сканирования составляет порядка 15% стоимости окончательного плана лесохозяйственных мероприятий. В бореальных хвойных лесах данные лазерного сканирования обеспечивают более точные оценки запаса стволов и настолько же точные оценки высоты деревьев, как и существующие сегодня методы расчетов на основе полевых данных. Пробные площади, необходимые для настройки данных лазерного сканирования, могут также использоваться для планирования на стратегическом уровне. Данные лазерного сканирования могут быть также полезны для автоматизированного выявления границ насаждений. С появлением в будущем данных лазерного сканирования высокой плотности станет возможным оценивать распределение деревьев по диаметру внутри каждого насаждения и, в сочетании с цифровыми аэрофотоснимками, это даст возможность оценить распределение стволов деревьев по породам.

Возможность выявления поваленных ураганом деревьев с помощью PCA CARABAS представляется интересной с учетом того, что работа устройства не зависит от погодных условий и освещения солнцем, а сам датчик устанавливается на реактивном самолете. Рабочим сценарием таких обследований с помощью CARABAS может быть съемка лесных территорий с большим запасом стволовой древесины и высоким уровнем риска повреждения ураганом примерно раз в пять лет. Эти снимки могут использоваться для повышения точности оценок запаса в базах данных, разработанных на основе оптических спутниковых снимков. Качество таких комбинированных оценок может быть достаточно высоким для того, чтобы ими могли воспользоваться и частные лесовладельцы. Основной мотивацией для такого регулярного обследования, однако, будет возможность сравнения радарных данных, полученных сразу после сильного урагана, с радарными данными, полученными незадолго до него. Так как поваленные

ураганом деревья обеспечивают более высокий ответный сигнал радара, а обычная рубка и удаление деревьев – более низкий сигнал, эти два вида изменений не будут смешиваться на радарных снимках, как это может произойти в случае с оптическими данными.

Для своевременного картирования отдельных лесных насаждений настоящий прорыв может обеспечить применение небольших беспилотных летательных аппаратов. Такие аппараты, которые приводятся в действие электродвигателем, уже широко используются военными, и существует высокая вероятность, что данные технологии будут распространены на гражданские области. Для создания беспилотного летательного аппарата, на борту которого будет находиться цифровая фотокамера, не требуется никаких дорогостоящих или секретных компонентов. Главной преградой до настоящего времени являлись правила управления воздушным движением, но, по крайней мере, в Европе, уже скоро будут введены в действие инструкции и правила по использованию небольших беспилотных летательных аппаратов в гражданском воздушном пространстве. Профессиональное использование небольших беспилотных летательных аппаратов в гражданских целях уже разрешено в некоторых странах, таких как Великобритания и Финляндия, и с большой долей вероятности, такие разрешения скоро будут получены и в других странах.

Даже в случае с эффективными, простыми и реалистичными подходами к дистанционному зондированию лесов, которые обсуждались в данной статье, можно констатировать, что в настоящее время мы находимся в процессе быстрого развития данной области. Новые датчики и платформы, такие как цифровые камеры, лазеры, радары и беспилотные летательные аппараты, а также действенное и реалистичное сочетание спутниковой технологии и полевых данных, предоставляют новые возможности, которые оптимизируют процесс получения информации о наших лесах. Помимо этого, существует много новых разработок, которые не обсуждались в этой статье и которые обеспечат дополнительные возможности в течение следующих 25 лет. Примерами этого может являться применение метода временных рядов и метода усвоения данных; автоматизированное дешифрирование с обучением оптических данных высокого разрешения; новые технологии лазерного сканирования с очень высокой плотностью сигнала; легко управляемые наземные лазерные сканеры, данные с которых можно будет интегрировать с измерениями, получаемыми с воздушных судов; информационные базы о насаждениях, получаемые с харвестеров, которые будут возможно использовать для сходных по строению насаждений, выявляемых по данным ДЗЗ; и, наконец, датчики на борту высотных стационарных беспилотных летательных аппаратов. Еще один важный вывод, однако, состоит в том, что государственная политика играет ключевую роль в развитии новых технологий. В соответствии с этой политикой, технически реализуемые варианты получения данных становятся, в конечном итоге, экономически и практически обоснованными. Такое утверждение справедливо в отношении доступа к спутниковым данным, в отношении политики аэрофотосъемки и получения других данных с воздушных судов, а также в отношении разрешений по использованию беспилотных летательных аппаратов.

Таблицы

Таблица 1. Точности оценки запаса стволовой древесины на уровне насаждений для различных датчиков дистанционного зондирования, с проверкой достоверности на том же испытательном участке, все оценки, за исключением фотограмметрических измерений выполнены с помощью регрессионных методов

Использованный датчик или датчики	Ссылки	Среднеквадр. погрешность, %
Спутниковые данные SPOT HRVIR, SPOT HRG или Landsat ETM+	Fransson <i>et al.</i> , 2004; Magnusson & Fransson, 2005a	23 – 31
Дешифрирование аэрофотоснимков в фотограмметрическом приборе	Magnusson & Fransson, 2005b	18 – 24
РСА УКВ CARABAS	Magnusson & Fransson, 2004	19
Сочетание CARABAS и SPOT HRVIR	Magnusson & Fransson, 2004	16
Лазерный сканер	Fransson <i>et al.</i> , 2004	12

Список использованной литературы

Erikson, M. and Olofsson, K. 2005. Comparison of three individual tree crown detection methods. *Machine Vision and Applications*. 16:258-265.

Fazakas, Z.; Nilsson, M.; and Olsson, H. 1999. Regional forest biomass and wood volume estimation using satellite data and ancillary data. *Agric. Forest Meteorol.* 98-99:417-425.

Fransson, J.E.S.; Walter, F.; Ulander, L. M. H. 2000. Estimation of forest parameters using CARABAS-II VHF SAR data. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*. 38:720-727.

Fransson, J.E.S.; Walter, F.; Blennow, K.; Gustavsson, A.; and Ulander, L.M.H. 2002. Detection of storm-damaged forested areas using airborne CARABAS-II VHF SAR image data. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing* 40:2170-2175.

Fransson, J.E.S., Magnusson, M., and Holmgren, J. 2004. Estimation of forest stem volume using optical SPOT-5 satellite and laser data in combination. In *Proceedings of IGARSS 2004 Symposium, Science for Society, Anchorage, Alaska, 20-24 September, 2004*, 5 pages (DVD-ROM).

Hagner, O. 1990. Computer aided forest stand delineation and inventory based on satellite remote sensing. In: *Proceedings from the SNS workshop The usability of remote sensing for forest inventory and planning. Remote sensing laboratory, Swedish University of Agricultural Sciences, Umeå. Report 4*, pp. 94-105.

Hagner, O. and Olsson, H. 2004. Normalization of within-scene optical depth levels in multi-spectral satellite imagery using National Forest Inventory plot data. In: *Proceedings from the 24th EARSeL Symposium, Dubrovnik, Croatia, May 28-29, 2004*. Millpress Rotterdam. pp 279-284.

Hagner, O. and Reese, H. 2006. A method for calibrated Maximum Likelihood classification of forest types. Accepted for publication in *Remote Sensing of Environment*.

Hellsten, H.; Ulander, L.M.H.; Gustavsson, A.; and Larsson, B. 1996. Development of VHF CARABAS II SAR. In G.S. Ustach (Ed.), *SPIE Vol. 2747. Radar Sensor Technology* (pp. 48-60). Marriottsville, MD: SPIE.

Holmgren, J. and Persson Å. 2004. Identifying species of individual trees using airborne laser scanning. *Remote Sensing of Environment* 90:415-423.

Holmgren, J. 2004. Prediction of tree height, basal area, and stem volume in forest stands using airborne laser scanning. *Scandinavian Journal of Forest Research* 19:543-553.

Holmgren, J. and Jonsson, T. 2004. Large scale airborne laser scanning of forest resources in Sweden. *Proceedings of the ISPRS working group VIII/2, Laser-Scanners for Forest and Landscape Assessments, Freiburg, Germany, 2004-10-03 to 2004-10-06. International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, vol 36, part8/W2, pp. 157-160.

Holmgren, J. and Wallerman, J. 2006. Estimation of tree size distribution by combining vertical and horizontal distribution of LIDAR measurements with extraction of individual trees. To appear in

proceedings from the EARSeL ISPRS Workshop, 3D Remote Sensing in Forestry, Vienna, 14-15 February 2006.

Magnusson, M. and Fransson, J.E.S. 2004. Combining airborne CARABAS-II VHF SAR data and optical SPOT-4 satellite data for estimation of forest stem volume. *Canadian Journal of Remote Sensing* 30:661-670.

Magnusson, M. and Fransson, J.E.S. 2005a. Estimation of forest stem volume using multispectral optical satellite and tree height data in combination, *Scandinavian Journal of Forest Research* 20:431-440.

Magnusson, M., and Fransson, J.E.S. 2005b. Evaluation of aerial photo-interpretation for estimation of forest stem volume at stand level. In *Proceedings of the EARSeL, IUFRO, ISPRS Workshop ForestSAT 2005, Operational Tools in Forestry Using Remote Sensing Techniques*, Borås, Sweden, 31 May-3 June, 2005, Swedish Forest Agency, Report 8 2005. Volume C, pp. 102-106. Available on line at: <http://www.svo.se/forlag/rapport.asp?boktyp=rapporter>

Næsset, E.; Gobakken, T.; Holmgren, J.; Hyyppä, H.; Hyyppä, J.; Maltamo, M.; Nilsson M.; Olsson H.; Persson, Å.; Söderman, U. 2004. Review article, Laser scanning of forest resources: the Nordic experience. *Scandinavian Journal of Forest Research*. 19:482-489.

Nilsson, M. 1996. Estimation of Tree Heights and Stand Volume Using an Airborne Lidar System. *Remote Sensing of Environment*. 56:1-7.

Nilsson, M.; Folving, S.; Kennedy, P.; Puumalainen, J.; Chirici, * Corona, P.; Marchetti, M.; Olsson, H.; Ricotta, C.; Ringvall, A.; Ståhl, G.; and Tomppo, E. 2003. Combining remote sensing and field data for deriving unbiased estimates of forest parameters over large regions. In: Corona, P., Köhl, M., and Marchetti, M (editors), *Advances in Forest Inventory for Sustainable Forest Management and Biodiversity Monitoring*. Kluwer Academic Publishers.

Nilsson, M.; Bohlin, J.; Olsson, H; Svensson, S.A. and Haapaniemi, M. 2004. Operational use of remote sensing for regional level assessment of forest estate values. In: *Proceedings from the 24th EARSeL Symposium, Dubrovnik, Croatia, May 28-29, 2004*. Millpress Rotterdam. pp 263-268.

Nilsson, M.; Holm, S.; Reese, H.; Wallerman, J. and Engberg, J. 2006. Improved forest statistics from the Swedish National Forest Inventory by combining field data and optical satellite data using post-stratification. Submitted.

Olofsson, K. 2002 Detection of single trees in aerial images using template matching, *ForestSAT 2002, Operational Tools in Forestry using Remote Sensing Techniques*, Proceedings CD-ROM, talk FI6.3, session Forest Inventory 6, Monitoring Forest Establishment and Development. Heriot Watt University, Edinburgh, Scotland, August 5th-9th, 2002.

Olofsson, K.; Wallerman, J.; Holmgren, J.; and Olsson, H. 2006. Tree species discrimination using Z/I DMC imagery and template matching of single trees. *Scandinavian Journal of Forest Research*. Accepted for publication.

Persson, Å.; Holmgren, J.; and Söderman, U. 2002. Detecting and Measuring Individual Trees Using an Airborne Laser Scanner. *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*, 68:925-932.

Pollock, R. J. 1996. *The Automatic Recognition of Individual Trees in Aerial Images of Forests Based on a Synthetic Tree Crown Image Model*, PhD Thesis, University of British Columbia, Vancouver, Canada.

Ranneby, B., Cruse, T., Hägglund, B., Jonasson, H., and Swärd, J. 1987. Designing a new national forest survey for Sweden. *Studia Forestalia Suecica*, No. 177. 29 p.

Reese, H.; Nilsson, M.; Sandström, P.; and Olsson, H. 2002. Applications using estimates of forest parameters derived from satellite and forest inventory data. *Computers and Electronics in Agriculture*. 37:37-56.

Reese, H.; Nilsson, M.; Granqvist Pahlén, T.; Hagner, O.; Joyce, S.; Tingelöf, U.; Egberth, M.; and Olsson, H. 2003. Countrywide estimates of forest variables using satellite data and field data from the National Forest Inventory. *Ambio* 32:542-548.

Steinvall, O. 2003. Laser systems for vegetation and terrain mapping – a look at present and future technologies and capabilities. In *proceedings from ScandLaser Scientific Workshop on airborne laser scanning of forests*, held in Umeå, Sweden, September 3 – 4, 2003. Swedish University of Agricultural Sciences, Department of forest resource management and Geomatics, working paper 112, pp 9-20.

Ståhl, G. 2004. The New Swedish National Forest Inventory. In: Forest Inventory and Planning in Nordic Countries, Proceedings of SNS Meeting at Sjusjoen, Norway, September 6-8, pp. NIJOS Report 9/05, ISBN 82-7464-351-8. pp133-142.

Tomppo, E. 1993. Multi-source national forest inventory of Finland. In: Proceedings Ilvessalo Symposium on National Forest Inventories, August 17 – 21, Finland, pp 52 – 59.

Ulander, L.; Smith, G.; Eriksson, L.; Folkesson, K.; Fransson, J.; Gustavsson, A.; Hallsberg, B; Joyce, S.; Fransson, J; Magnusson, M.; Olsson, H.; Persson, Å.; and Walter, F. 2005. Evaluation of using space- and airborne radar for mapping of wind-thrown forests after the January 2005 hurricane in southern Sweden.

In: Proceedings of the EARSeL, IUFRO, ISPRS Workshop ForestSAT 2005, Operational Tools in Forestry Using Remote Sensing Techniques, Borås, Sweden, 31 May-3 June, 2005, Swedish Forest Agency, Report 8 2005. Volume A, pp. 99-104. Available on line at:
<http://www.svo.se/forlag/rapport.asp?boktyp=rappporter>