

Особенности радиолокационных контрастов лесонасаждений

Л.М. Атрошенко², К.П. Гайкович³, Н.Н. Горобец¹, С.И. Костяшкин⁴, Л.П. Сафронова¹

¹ Харьковский национальный университет им. В.Н. Каразина
61077 Украина, г. Харьков, пл. Свободы, 4
E-mail: Nikolay.N.Gorobets@univer.kharkov.ua

² Научно-производственное объединение «КВ-А-НТ»
61183 Украина, г. Харьков, ул. Дружбы Народов, 244
E-mail: cw-a-nt@max.net.ua

³ Институт физики микроструктур РАН
ГСП - 105, Россия, Нижний Новгород
E-mail: gai@ipm.sci-nnov.ru

⁴ Харьковская государственная лесоустroительная экспедиция
62458 Украина, Харьковская обл., пос. Покотиловка, ул. Железнодорожная, 11
E-mail: XDLE@vilcom.net

Радиолокационные и радиотеплолокационные контрасты лесонасаждений отличаются от таких для древостоев естественного происхождения за счет рядности структуры. Показано влияние нагревания фитоэлементов и сквозистости (ажурности) крон деревьев на формирование собственного и вторичного излучения древостоями в целом и его особенности для лесонасаждений рядной структуры.

Введение

Лесонасаждения как объект дистанционного зондирования по сравнению с другими древостоями имеют характерологические особенности инфраструктуры, что приводит, в частности, к специфическим особенностям характеристик результатов их активной и пассивной радиолокации. Установлению идентификационных признаков лесонасаждений и посвящена настоящая статья.

1. Особенности инфраструктуры лесонасаждений

На территории Украины лесонасаждения как правило имеют монопородную рядную структуру. С точки зрения изучения их инфраструктуры это прежде всего сказывается на виде распределений расстояний между деревьями.

1.1. Метод определения расстояния между деревьями

Для определения расстояний между деревьями, на местности строится картосхема тестового участка [1] в масштабе 1:100. Для ее построения на высоте 1,5 м измеряется расстояние между стволами последовательно каждой пары близстоящих деревьев и специальной вилкой их диаметр в двух взаимно перпендикулярных направлениях. На картосхеме отмечается сумма расстояний между стволами и усредненных радиусов стволов двух деревьев. В камеральных условиях на картосхеме, определяя последовательно каждое из деревьев в качестве центрального, измеряется расстояние между отметками центра ствола центрального дерева и стволов всех деревьев его первого координационного контура. Первый координационный контур определяется по простому принципу: прямые, соединяющие стволы его деревьев со стволом центрального дерева, не должны пересекать ни одной из проекций крон. Такой метод определения расстояний между деревьями удобен еще и для более точного, чем существующие, расчета площади питания деревьев в изучаемом древостое и определения их количества по данным о площади лесного массива. Как известно, форма площади питания дерева максимально приближается к форме круга. Из простых геометри-

ческих фигур ближе всего по площади к площади круга правильный шестиугольник. Среднее расстояние между деревьями, полученное приведенным способом, дает усредненную сторону шестиугольника, по которому и рассчитывается средняя площадь питания деревьев и их количество:

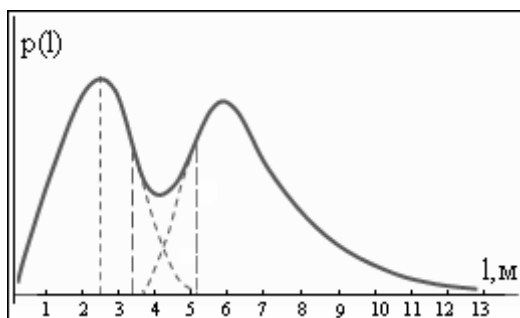


Рис. 1. Плотность вероятности распределения расстояний между деревьями в лесонасаждении (дуб черешчатый, средневозрастной)

$$S_{\text{пит}} = \frac{\sqrt{3}}{2} r^2; N = 2 \frac{S_{\text{м}}}{r^2 \sqrt{3}}.$$

Здесь: N – количество деревьев в лесном массиве; $S_{\text{м}}$ и $S_{\text{пит}}$ – площадь массива и площадь питания дерева соответственно, r – среднее расстояние между деревьями, определенное приведенным выше способом.

Очевидно, что результаты такого расчета уточняют оценку продуктивности леса и могут быть полезны для изучения степени использования потенциальной продуктивности природных условий произрастания древостоев.

Типичный вид распределений расстояний между деревьями в лесонасаждениях приведен на рис. 1. Как видно,

распределения бимодальны. Одна мода соответствует расстоянию между рядами деревьев (в нашем случае – 2,5 м), другая – модальному расстоянию деревьев в ряду.

1.2. Метод измерения углов наклонов листовых пластин и ветвей

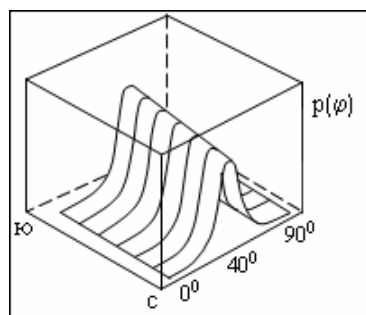


Рис. 2. Плотность вероятности распределения углов наклона и ориентации листовых пластин

Углы наклона измеряются нами обычно из люльки автовышки АТП-17 с применением простейшего устройства. В плексигласовую пластину нормально к плоскости ее поверхности впаивается металлический стержень, к которому крепятся транспортир и отвес. Т.о., при совмещении пластины с большей частью поверхности листовой пластины стержень располагается по нормали к последней, угол наклона и азимут которой и фиксируется. На рис. 2 представлен типичный вид распределения углов наклона листовых пластин дуба черешчатого. Как видно,

распределение по азимуту фактически равномерно, распределение же по углам наклона имеет ярко выраженную моду, соответствующую, как показали наши исследования в различных

регионах, углу максимального подъема солнца для данной географической широты.

1.3. Сквозистость крон

Для изучения сквозистости (ажурности) крон была разработана специальная фотограмметрическая методика. Сквозистость крон как с учетом перспективных искажений для целей моделирования инфраструктуры древостоев, так и без их учета (для целей ДЗЗ в оптическом диапазоне) оценивается простым подсчетом процентного соотношения площадей, свободных от фитоэлементов и закрытых ими. Сквозистость крон изучалась под разными углами (рис. 3). Минимальная

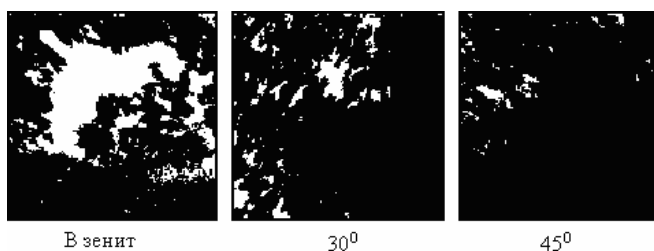


Рис. 3. Первичный материал для фотограмметрической оценки сквозистости крон под разными углами визирования

сквозистость наблюдается при угле визирования, соответствующем углу максимального подъема солнца над горизонтом на широте местности, где расположен древостой.

2. Особенности радиолокационных и радиотеплолокационных характеристик лесонасаждений

2.1. Радиотепловые контрасты древостоев

Исследовалось влияние на формирование исходящего собственного сигнала древостоев их проективного покрытия.

Проективное покрытие поверхности почвы лесообразующими породами определяется двумя составляющими: проекциями кроны и их сквозистостью. И тот и другой показатель с одной стороны является характеристикой лесообразующей породы (ее вида, возраста, состояния и т.п.), а с другой – зависит от угла визирования. Площадь горизонтальных проекций кроны определяется в камеральных условиях по построенным картам. Измерения мощности кроны и ее вертикального контура позволяют рассчитать проективное покрытие кроны под разными углами визирования. Для любого не изреженного древостоя находится такой интервал углов визирования, в котором проективное покрытие близко к 100%. Это – интервал $\pm 5\div 7$ градусов вблизи угла максимального подъема солнца над горизонтом, определяемого широтой местности.

Исследовалась радиояркая температура T_{α} березняка молодого (~20 лет) и средневозрастного (~50 лет), сосняка средневозрастного (~70 лет). Измерения проводились в зенит при сквозистостях кроны (s) в пятне антенны в зенит соответственно 10;11, 5 и 12%, облачности 10 баллов, в штиль. Вертикальный профиль температур в кронах деревьев практически совпадал с температурой воздуха в древостое на высоте 2 м. Данные измерений в сопоставлении со средневзвешенной температурой T по вертикальному профилю кроны над антенной приведены в таблице 1 и на рис. 1. Как видно, данные по α строго коррелируют со сквозистостью кроны. Удаление со всей площади пятна антенны 447,3 шт/м² листьев в кроне средневозрастной березы привело с одной стороны к увеличению ее сквозистости на ~1%, а с другой – к понижению радиояркой температуры на 2 К. Следовательно, при зондировании в надири в таких же долях нужно принимать во внимание то, что расположено под кроной. Это дает возможность диагностировать низовые пожары и подтопления.

Изменение угла места до ~40° (сквозистость <1%) приводило к изменению α березы средневозрастной до 0,9874.

Таблица 1. Характеристики древостоев

Древостой	T, K	T_{α}, K	α	$S, \%$
Береза среднев.	288,2	274,8	0,9535	10,0
Береза молодая	288,4	246,7	0,8554	11,5
Сосна среднев	288,2	243,4	0,8445	12,0

Радиояркая температура древостоя во многом определяется пестротой термодинамической температуры его составляющих (различия в освещенности и, следовательно, температуре разных сторон кроны, собственно древостоя и полян и т.п.). В схожих температурных условиях она существенно различается в зависимости от наличия / отсутствия солнечного освещения и его предыстории, наличия / отсутствия осадков.

Принято считать, что коэффициент излучения плотно стоящих древостоев в радиодиапазоне близок к единице, т.е. в пределах погрешности эксперимента $T_m = T_{\alpha}$ где T_m – температура воздуха на высоте 2 м (в дальнейшем для краткости будем называть этот показатель просто температурой воздуха). Однако, по нашим многолетним наблюдениям температура воздуха характеризует тем-

температуру всего объема древостоя и слагающих его элементов с точностью до погрешности измерения в редчайших случаях, соответствующих следующим условиям: штиль, облачность 10 баллов, такие же погодные условия не менее 3 суток до момента наблюдения, время – ± 3 часа от полудня. Как показывают наши эксперименты, в этих условиях радиояркая температура леса действительно практически совпадает с температурой воздуха в древостое на высоте 2 м.

В других же условиях профиль температур в воздушном пространстве древостоя очень непостоянен и зависит от многих факторов, таких как: породный состав, вид почв, наличие подроста, вида подлеска и травянистого покрова, погоды, времени суток, температуры воздуха и ее предыстории. Существенно отличается, как правило, от температуры воздуха и температура элементов древостоя. Так, например, при ярком солнечном свете в лесах наблюдается с одной стороны сильный нагрев обращенных наружу сторон крон, а с другой – охлаждение их вследствие испарения воды с поверхности фитоэлементов. Баланс этих двух процессов – явление многофакторное, и надежно прогнозировать итоговый результат в общем случае представляется маловероятным. Большую роль в формировании радиотеплового сигнала облиственных древостоев играет перепад температур листовых пластин в зависимости от их экспозиции – различия в температурах листовых пластин на теневой и солнечной сторонах кроны в солнечный день достигает 10 и более градусов. В связи с этим появляется температурная «пестрота», радиус автокорреляции которой равен расстоянию между деревьями. Этот перепад зависит от температурной и освещенностной предыстории древостоя. Если говорить об абсолютных значениях, то ориентировочно можно о температуре обращенных к солнцу листовых пластин судить по температуре на открытом участке поверхности почвы. А о температуре листовых пластин на теневой стороне кроны – по температуре на высоте 2 м минус 0,5 град. Понятно, что даже при прочих равных одно только влияние перепада температур на величины диэлектрических характеристик листовых пластин будет обеспечивать существенные радиоконтрасты.

В Харьковской области ($\sim 50^\circ$ СШ) с использованием модуляционного радиометра ($\lambda = 3$ см) с вышки проводились измерения радиояркой температуры ясеневно-кленовой свежерастворенной дубравы (молодняк, ~ 30 лет). Использовалась рупорная антенна с шириной диаграммы направленности $\Delta\varphi = 20^\circ$. Чувствительность радиометра при постоянной времени $\tau = 1$ с составляла $\delta T_{\text{я}} = 0,1$ К, ширина полосы приема $\Delta\nu = 200$ МГц. Калибровка выполнялась по двум источникам с известной яркостной температурой. Первая серия измерений проводилась с соблюдением всех вышеперечисленных условий: при облачности 10 баллов в течение более чем 3 суток, в штиль, в середине дня. Таким путем достигалось исключение влияния на результаты измерений прямого нагрева элементов древостоя солнцем. Угол визирования во всех случаях составлял $\sim 50^\circ$, т.е. в направлении минимальной сквозистости древостоя. Тем самым достигались условия, при которых исходящее собственное излучение древостоя формировалось в основном листовыми пластинами.

Радиояркая температура и коэффициент излучения древостоя существенно отличались от данных, полученных от других видов земных покровов (см. табл. 2), причем радиотепловые контрасты обеспечивались как различиями в термодинамической температуре объектов, так и их структурой.

Таблица 2. Характеристики различных видов земных покровов

Тип покрова	T объекта, К	$T_{\text{я}}$ объекта, К	ϵ
Дубрава	290,4	290,3	0,9996
Пашня	293,2	276,3	0,9423
	291,6	274,7	0,9420
Пашня со всходами	291,6	276,9	0,9496
Пашня со злаками	293,2	288,9	0,9853

(Почва – глинозем; размеры конкрементов – до 10 см; под всходами – культивируемая; линейные размеры неровностей – до 3 см)

Благодаря выбранным для проведения эксперимента погодным условиям азимут визирования не сказывался на результатах измерений.

Температура воздуха в древостое на высоте 2 м составляла 290,4 К, относительная влажность воздуха равнялась 93%. Колебания температуры по всему объему древостоя не превышали 0,2°. Эффективная температура воздуха (средневзвешенная по объему древостоя) составляла 290,36 ± 0,1 К ($p > 0,95$). Радиояркая температура дубравы составляла в этих условиях 290,3 К. Как видно, коэффициенты излучения, рассчитанные по сопоставлению полученной радиояркой температуры с температурой воздуха и с эффективной температурой древостоя фактически идентичны – 0,9996 и 0,9998 соответственно.

В других же погодных условиях наблюдалась совершенно иная картина. При температуре воздуха на высоте 2 м 297,5 К, нулевой облачности, штиле, относительной влажности воздуха, равной 35%, эффективной температуре, равной 298,56 ± 0,1 К ($p > 0,95$), проводились такие же измерения, но в двух различных направлениях – со стороны солнца (т.е. проводились наблюдения стороны древостоя, освещаемой солнцем), и с противоположной стороны. Радиояркая температура дубравы в этих измерениях в среднем составила соответственно 301,7 К и 298,3 К. Иными словами, при сопоставлении с эффективной температурой древостоя получен коэффициент излучения, равный 0,9991 при наблюдениях его затененной стороны. В противоположном случае радиояркая температура была выше как температуры воздуха в древостое на высоте 2 м, так и эффективной его температуры.

В рассматриваемом случае наблюдался и другой важный эффект: за счет рядности лесонасаждения при его панорамных наблюдениях четко просматривалась регулярная структура графика зависимости T_a от азимута визирования с периодичностью, определяемой шириной рядов лесонасаждения и расстоянием до объекта наблюдения.

2.2. Радиолокационные особенности лесонасаждений

Рядность лесонасаждений сказывается и на результатах радиолокационного их наблюдения – во многом вследствие описанной выше зависимости характеристик фитоэлементов от их экспозиции.

Радиолокационные исследования лесонасаждений проводились с применением РСА сантиметрового диапазона с борта самолета – лаборатории ИРЭ РАН и КА «Алмаз».

Параметры амплитудных распределений ЭПР радиолокационных снимков дубрав и сосняков существенно различаются – текстура радиолокационных изображений сосняков гораздо более диффузна, чем текстура изображений дубрав (рис. 4). Понятно, что такой результат достигается в основном за счет различий в строении основных элементов, формирующих радиолокационный отклик – листовой пластины и охвоенной ветви – и инфраструктуры древостоя в целом. Текстурные признаки радиолокационного изображения ($\nu = \frac{\mu_1^2}{\mu_2}$ и $\chi = \frac{\mu_1}{\sigma}$) позволяют надежно различать

не только породный состав лесонасаждения, но и его состояние [2]. Важен другой результат.

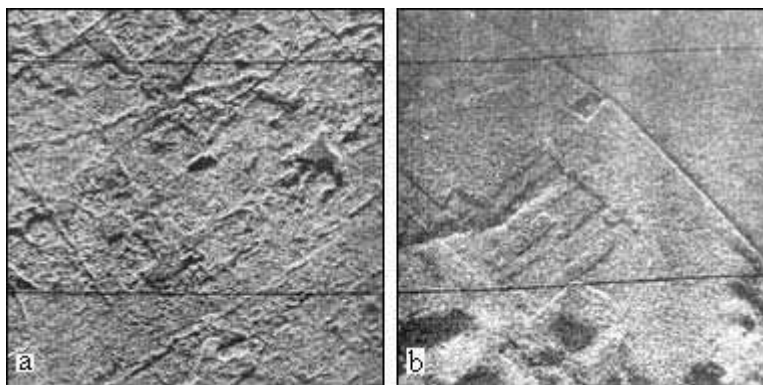


Рис. 4. Визуализация результатов радиолокационных наблюдений древостоев: а) дубравы; б) сосняки.

Если в древостоях естественного происхождения (байрачные дубравы Спиваковского стационара) расстояние между деревьями (в этих древостоях оно одномодально) достоверно коррелирует с радиусом автокорреляции амплитуды ЭПР на радиолокационном изображении, то в лесонасаждениях такая корреляция отсутствует. Полученный результат вполне объясним: одна из мод распределения этого параметра в лесонасаждениях задана изначально и со временем не меняется. Расстояние же между деревьями - один из основных параметров для определения возраста древостоя в условиях отсутствия априорной информации (как при проведении дистанционного зондирования лесов с целью определения их таксационных характеристик). В лесонасаждениях идентификационным признаком возраста является вторая мода распределения плотности вероятности расстояния между деревьями.

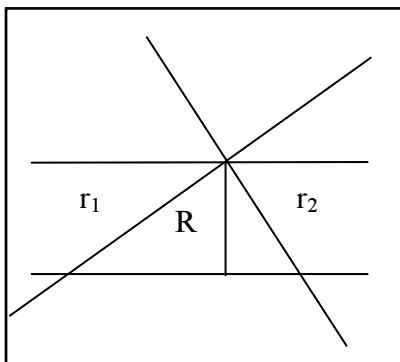


Рис. 5. Расчет радиуса R автокорреляционной функции ЭПР лесонасаждений

Для решения задачи дистанционного определения второй моды распределения расстояния между деревьями в лесонасаждениях разработана методика определения направления рядности произрастания деревьев. Геометрия решения этой задачи предельно проста и показана на рис. 5. На радиолокационных снимках производятся расчеты радиусов автокорреляции амплитуды ЭПР в двух произвольно выбранных взаимноперпендикулярных направлениях. По результатам расчетов определяется радиус автокорреляции поперек рядности (назовем его поперечным радиусом автокорреляции) и направление рядов лесонасаждения. Затем рассчитывается продольный радиус автокорреляции - по направлению вдоль рядов. В зависимости от разрешающей способности РСА этот радиус либо равен, либо коррелирует с искомым модальным расстоянием между деревьями в ряду.

В целях апробирования этого метода было проведено несколько сеансов радиолокационного зондирования лесных массивов Спиваковского и Скрипаевского полигонов - стационаров (Харьковская обл.) с применением РСА сантиметрового диапазона с борта самолета - лаборатории ИРЭ РАН в серии заходов, сопровождаемых полным комплексом синхронных наземных наблюдений.

23 июня 1991 года в Харьковской области с привлечением синхронных наземных наблюдений была проведена съемка древостоев, в том числе и лесонасаждений, РСА, базировавшемся на КА «Алмаз».

В каждом случае анализировались характеристики более 100 древостоев (выделов).

Полученные результаты расчетов продольных радиусов автокорреляции амплитуд ЭПР достоверно коррелируют со второй модой распределения плотностей вероятности расстояния между деревьями в лесонасаждениях. Таким образом открывается возможность получения дистанционной информации для определения возраста лесонасаждений со столь же высокой достоверностью, как и в естественных древостоях.

В заключение авторы выражают глубокую признательность Борису Георгиевичу Кутуза, Анатолию Анатольевичу Калинкевичу и Леону Богуславовичу Неронскому за организацию и проведение серии радиолокационных исследований и коллективу Харьковского национального аграрного университета за организационную помощь в обеспечении наземного сопровождения ДЗЗ.

Литература

1. Атрошенко Л.М., Горобец В.Н., Горобец Н.Н., Костяшкин С.И., Сафронова Л.П. Методики описания лесных территорий в целях обеспечения эффективного дешифрирования спутниковой информации РСА // Настоящий сборник.
2. Атрошенко Л.М., Горобец Н.Н. Перспективы изучения методами радиолокации таксационных характеристик и степени техногенной загрязненности лесов. Вісник Харьк. нац. ун-ту ім. В.Н. Каразіна. Радіофізика та електроніка. - 1'2004, №622, -с.132-136.