

Исследование радиотеплового излучения пшеничного массива в миллиметровом диапазоне радиоволн применительно к задачам дистанционного зондирования

Ю. И. Малышенко, А. Н. Роечко

*Институт радиофизики и электроники НАН Украины,
Украина, 61085, г. Харьков, ул. Ак. Проскуры, 12
E-mail: rk@ire.kharkov.ua*

Статья поступила в редакцию 30 мая 2003 г., после переработки 22 октября 2003 г.

Представлены результаты измерений радиотепловых характеристик растительного покрова – сезонных, угловых и поляризационных зависимостей, а также погонного затухания радиоволн *Ka*-диапазона в озимой пшенице. Отмечено явление поляризационной инверсии, состоящее в том, что в период колосения в пшеничном массиве значения яркостной температуры при горизонтальной поляризации излучения немного выше, чем при вертикальной. Показана перспективность многоканального радиотеплового зондирования для определения биометрических параметров растительного покрова.

Наведено результати вимірювань радіотеплових характеристик рослинного покриву – сезонних, кутових та поляризаційних залежностей, а також погонного затухання радіохвиль *Ka*-діапазону в озимій пшениці. Відзначено явище поляризаційної інверсії, яке полягає в тому, що в період колосіння у пшеничному масиві значення яскравісної температури при горизонтальній поляризації випромінювання трохи вищі, ніж при вертикальній. Показано перспективність багатоканального радіотеплового зондування для визначення біометричних параметрів рослинного покриву.

Введение

Микроволновые активные и пассивные системы дистанционного зондирования являются полезным дополнением к традиционному используемому в этих целях устройствам оптического и инфракрасного диапазона длин волн. Особенно привлекательны такие их свойства, как всепогодность, способность получать информацию о достаточно глубоких слоях грунта (*P*-, *L*- и *C*-диапазоны волн) и более подробно исследовать состояние растительности (*X*- и *Ka*-диапазоны волн), что представляет интерес для изучения почвенно-растительных покровов. При работе в *X*- и *Ka*-диапазонах длина волны оказывается соизмеримой с

характерными размерами элементов растений: диаметром колосьев и стеблей злаковых и некоторых других сельскохозяйственных культур, веток деревьев, а также с размерами листьев, хвойных игл и т. д. На эти частоты приходится максимум релаксационной дебаевской полосы поглощения воды, которая циркулирует в несвязанном виде по растительным и почвенным каналам при биологически активных температурах. Эти особенности определяют важную роль *X*- и *Ka*-диапазонов волн для изучения растительности, в частности, для прогнозирования количественных показателей, характеризующих состояние сельскохозяйственных культур на стадии вегетации: биомассы, урожайности, сроков созревания

ния и многих других параметров. Подобные исследования проводятся во многих научных центрах мира (США, Италия, Голландия, Россия) и основополагающие результаты отражены в ряде статей и монографий [1-10]. Ко времени выполнения настоящей работы в ИРЭ НАНУ уже был накоплен достаточно большой объем данных многолетних исследований радиолокационных характеристик основных элементов природных и антропогенных ландшафтов в *Ka*-диапазоне волн с борта летательных аппаратов (ЛА), в основном, для решения прикладных задач [11]. С помощью наземного скаттерометра были проведены исследования эффективной поверхности рассеяния (ЭПР) отдельных почвенно-растительных покровов [12] и злаков [13], а также с борта ЛА измерены яркостные температуры $T_{я}$ различных сельскохозяйственных культур [14].

В статье представлены результаты сезонных измерений радиотепловых характеристик зерновых культур и обсуждаются возможности применения радиофизических устройств, работающих в *Ka*-диапазоне, для решения задач прогнозирования урожайности, предсказания сроков созревания и уборки урожая.

Аппаратура и методика измерений

В качестве объекта исследований была выбрана озимая пшеница (сорт "Безостая-1"). Для получения наиболее типовых значений ее радиотепловых характеристик измерения проводились в районе выращивания элитных сортов твердой пшеницы (юг России) в период с 6 июня по 5 июля (со 157 по 186 день от начала года). Начало наблюдений совпало с завершением интенсивного роста растений и началом колошения, окончание – с завершением цикла развития пшеницы и началом жатвы.

Измерительная площадка находилась на краю крупного пшеничного поля площадью ≈ 35 га. Для исследования угловых и поляризационных зависимостей радиотеплового излучения была смонтирована наклонно-поворотная вышка высотой ≈ 4 м. При этом площадь "освещенного" пятна была достаточно большой для обеспечения представительного усредне-

ния с сохранением однородности покрова по биометрическим показателям. Путем изменения наклона вышки можно было регистрировать радиотепловое излучение растительности в диапазоне углов падения $0 \div 70^\circ$. Радиометр был установлен на внутренней платформе, поворачивающейся вокруг горизонтальной оси на 360° , что позволяло при любом положении вышки быстро направлять радиометр в зенит для выполнения калибровки. Прием радиотеплового излучения от растительности на двух ортогональных линейных поляризациях производился путем "мгновенного" поворота СВЧ блока радиометра вокруг антенной оси на 90° . Таким образом, ось рупорной антенны при всех углах падения была направлена в одну и ту же точку растительного покрова, т. е. объект исследований оставался неизменным.

Для измерения $T_{я}$ использовался модуляционный супергетеродинный радиометр с шириной полосы приема 1 ГГц и центральной частотой 35 ГГц ($\lambda = 8.5$ мм). Ширина диаграммы направленности рупорной антенны на центральной частоте составляла 7.5° . Для повышения точности измерений в радиометре была предусмотрена система внутренней термостабилизации и периодическая калибровка всего приемного тракта вместе с антенной по двум внешним эталонам, полностью перекрывающим раскрыв рупора. Первый эталон находился при температуре окружающей среды (во время дневных измерений она была близка к 300 К и контролировалась качественным ртутным термометром), второй – при температуре жидкого азота (78 К). Измеренная с их помощью чувствительность радиометра составила 0.5 К при времени усреднения 1 с.

Погрешность измерения яркостной температуры, оцененная как половина доверительного интервала с вероятностью 0.9 в соответствии с выражением $\Delta T_{рад} \pm 1.6 \Delta T_{рад} / (2n)^{0.5}$ [15], где $\Delta T_{рад}$ – чувствительность радиометра, n – число независимых отсчетов в фрагменте записи, составила ≤ 0.9 К.

Для измерения погонного затухания использовалась активная система. Выбирались предельно короткие трассы длиной от 1.15 до 2.1 м между пирамидальными рупорами (пе-

редающим, с апертурой 50×30 мм, длиной 105 мм, и приемным, с апертурой 34×34 мм, длиной 60 мм). Переносные передающий и приемный узлы были закреплены на опускаемых рейках фотоштативов. Это позволяло поднимать рупорные антенны над растительным массивом, а затем опускать их на требуемую глубину. Таким образом, сначала измерялся уровень сигнала на входе в слой, затем на выходе из слоя. По величине отношения измеренных сигналов рассчитывался коэффициент ослабления. Для повышения чувствительности осуществлялось синхронное усиление сигнала после детектора на частоте модуляции генератора. Погрешность измерения затухания составляла ± 1 дБ.

Одновременно с радиофизическими исследованиями регулярно проводились измерения метеорологических параметров, измерялись температура и влажность $w(\%)$ образцов почвы, а также биометрические параметры растительного покрова (см. рис. 1). Среди интегральных показателей растительности контролировались следующие: количество общей зеленой биомассы на 1 м^2 пшеничного массива Q ($\text{кг}/\text{м}^2$) и величины поверхностной W ($\text{кг}/\text{м}^2$) и объемной M ($\text{кг}/\text{м}^3$) запасенной влаги, причем $W = M/h$, где h – высота слоя.

Из рис. 1 видно, что к началу измерений листья уже практически перестали быть основными излучающими элементами. Главный вклад в излучение начинают вносить стебли и колосья.

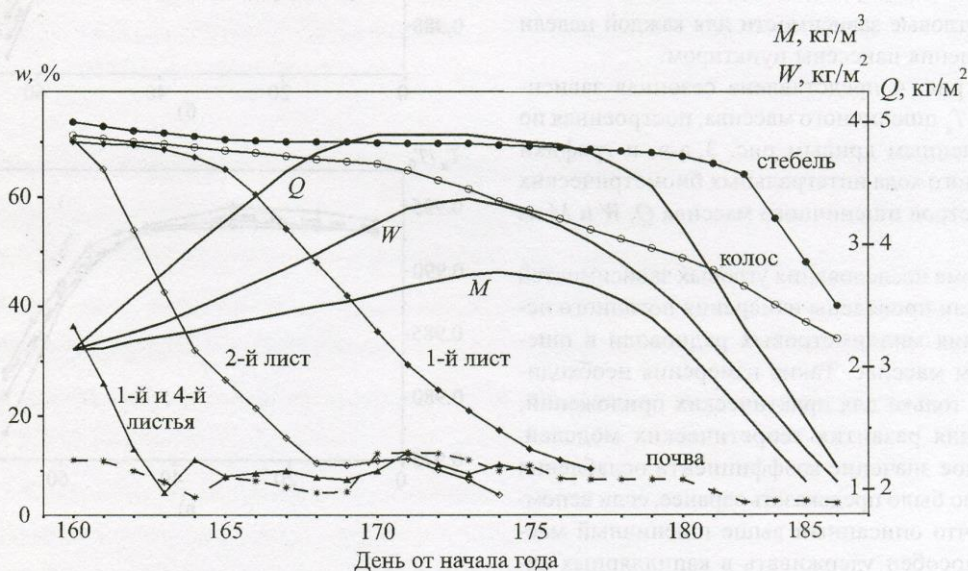


Рис. 1. Сезонные вариации влагосодержания w элементов растений, поверхностной Q и объемной M плотностей биомассы, поверхностной запасенной влаги W

Результаты измерений

Типичный вид измеренных угловых зависимостей яркостной температуры $T_y(\theta)$ пшеничного массива, нормированной на температуру окружающей среды T_0 , приведен на рис. 2. Здесь и далее кривые помечены датами проведения измерений. Видно, что для обеих поляризации

кривые весьма близки друг к другу, особенно при $\theta < 45^\circ$. Поэтому далее, на рис. 3, представлена сводка полученных угловых зависимостей лишь для вертикальной поляризации. Они разбиты на три группы – для первой (рис. 3, а), третьей (рис. 3, б) и четвертой (рис. 3, в) недель периода наблюдений. Усредненные (обобщаю-

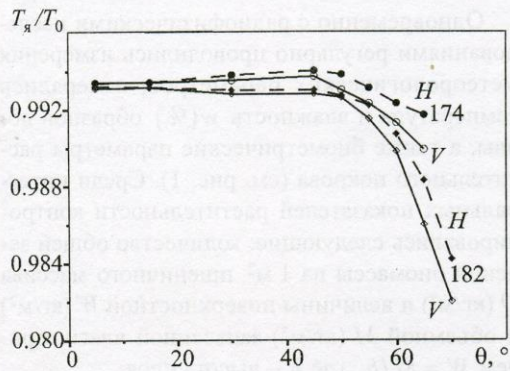


Рис. 2. Угловые зависимости нормированной яркостной температуры T_y/T_0 для вертикальной (V) и горизонтальной (H) поляризации

щие) угловые зависимости для каждой недели наблюдения нанесены пунктиром.

На рис. 4 представлена сезонная зависимость T_y пшеничного массива, построенная по усредненным кривым рис. 3, а-в, и графики сезонного хода интегральных биометрических параметров пшеничного массива Q , W и M из рис. 1.

Кроме исследования угловых зависимостей T_y , были проведены измерения погонного ослабления миллиметровых радиоволн в пшеничном массиве. Такие измерения необходимы не только для практических приложений, но и для развития теоретических моделей. Большое значение коэффициента ослабления γ можно было предсказать заранее, если вспомнить, что описанный выше пшеничный массив способен удерживать в капиллярных каналах растений по несколько килограммов несвязанной воды в единичном объеме воздуха, что заметно превышает водность сильного дождя, как известно, значительно ослабляющего проходящее сквозь него излучение мм диапазона. В такой ситуации полезно провести измерения ослабления τ (нп) при нескольких значениях толщины слоя l , чтобы убедиться в выполнении закона Бугера:

$$P_{\text{прош}} = P_{\text{пад}} e^{-\alpha l} = P_{\text{пад}} e^{-\tau},$$

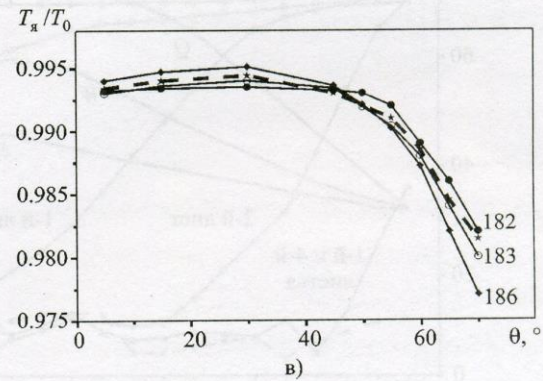
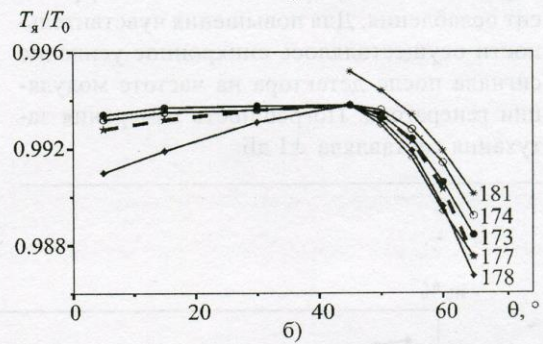
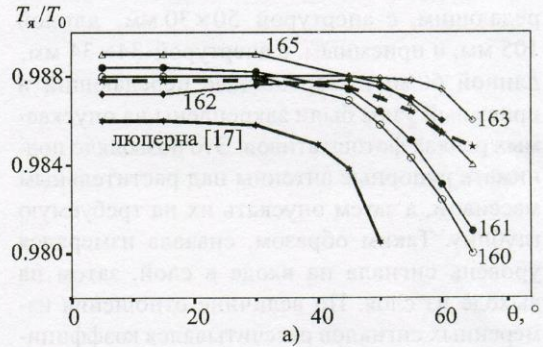


Рис. 3. Угловые зависимости нормированной яркостной температуры T_y/T_0 для вертикальной поляризации в течение сезона наблюдений. Числа у кривых – номера дней наблюдения

где $\alpha = 1/l \ln(P_{\text{пад}}/P_{\text{прош}})$ – коэффициент погонного ослабления, нп/м. Часто вместо него используется коэффициент $\gamma = 4.34\alpha$ (дБ/м). Как было отмечено, γ измерялся на двух дистанциях $l = 1.1$ м и $l = 2.2$ м. Полученное 27 июня (178 день от начала года) значение

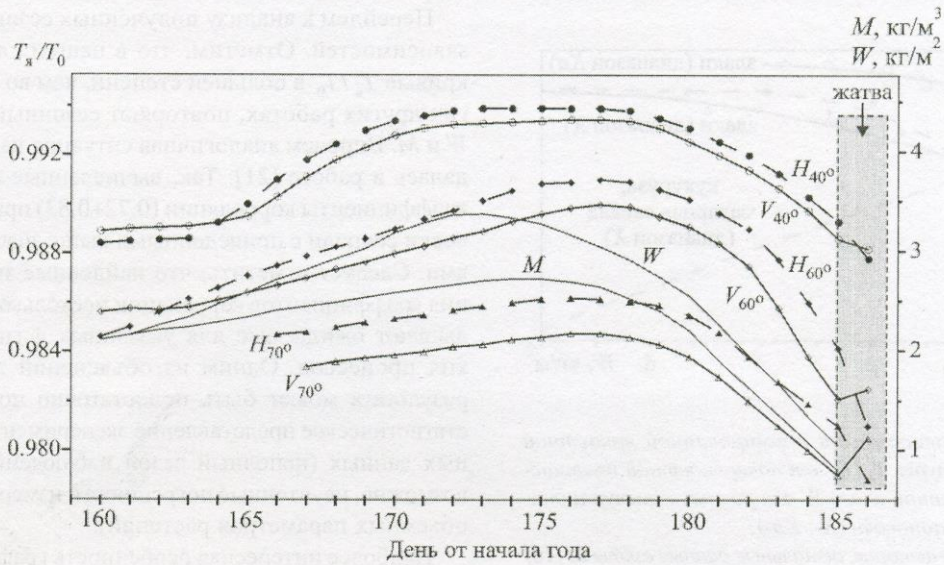


Рис. 4. Сезонные зависимости плотностей запасенной влаги W , биомассы M и нормированной яркостной температуры $T_{я}/T_0$ пшеничного массива для вертикальной (V) и горизонтальной (H) поляризации и $\theta = 40^\circ, 60^\circ$ и 70°

коэффициента ослабления вертикально поляризованного излучения Ka -диапазона составило $\gamma_{изм} = 22.5$ дБ/м.

Анализ и сопоставление результатов измерений радиотеплового излучения пшеничного покрова

Рассмотрим полученные угловые зависимости. Поскольку зависимостей такого типа для пшеницы в Ka -диапазоне у других авторов не найдено, то для сравнения на рис. 3, а нанесена измеренная зависимость $T_{я}(\theta)$ для близкой по степени густоты культуры – люцерны – из работы [17]. Как видно, и в этом случае наблюдается слабая угловая зависимость и высокие значения $T_{я}$. Такие же чрезвычайно высокие значения $T_{я}$ зафиксированы для подобных растительных покровов и в других работах [13, 16-20]. Малый диапазон изменения значений $T_{я}$ и их близость к T_0 является следствием большого ослабления мм волн во всех злаковых, люцерне, кронах некоторых густых деревьев (клен, ель и др.). Это ослабление

препятствует выходу излучения из внутреннего объема такой среды, т. е. радиотепловой сигнал в этом случае мало чувствителен к интегральным параметрам внутренней части растительного массива Q, W и, соответственно, сравнительно мало информативен (см. на рис. 5 результаты измерений авторов, а также кривые из [16] для Ka -диапазона). Но на более низких частотах (X -, C - и L -диапазоны [18-20]) на протяжении почти всего периода накопления биомассы нет насыщения, т. е. сохраняется близкое к линейному соответствие между $T_{я}$ и запасенной в растительном покрове влагой (см. нижние графики на рис. 5 для X -диапазона). В данном случае эти диапазоны более информативны для систем дистанционного зондирования. Но мм диапазон в силу повышенной интенсивности радиотеплового излучения от растительного покрова по-своему уникален для изучения (обнаружения) слабо развитой растительности на фоне голой почвы. Поэтому для изучения растительности следует использовать многоканальные системы дистанционного зондирования, чтобы независимо от

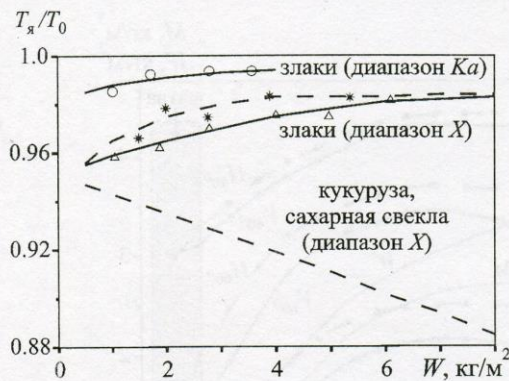


Рис. 5. Зависимости нормированной яркостной температуры $T_{я}/T_0$ от поверхностной плотности запасенной влаги W для разных культур и диапазонов радиоволн (X -, Ka -):
 о — данные авторов, остальные данные взяты из [16]

типа растительности, попавшей в конкретный сектор обзора, всегда можно было выбрать наиболее информативный канал для изучения ее параметров. Более того, в работе [21] предлагается включать в перечень “растительных” каналов L -диапазон, который традиционно считается “почвенным”. Полезность этого доказали опыты по дистанционному зондированию биомассы пшеничного массива. При использовании только Ka - и X -диапазонов, полученный коэффициент корреляции для зависимости $T_{я}(W)$ составил 0.76 в случае горизонтальной поляризации и 0.67 в случае вертикальной при абсолютной погрешности для W порядка 0.4 кг/м^2 . Включение в общую программу восстановления W L -диапазона привело к снижению погрешности до 0.1 кг/м^2 для $\theta_{\text{опт}} = 50^\circ$.

Кроме того, исследование сельскохозяйственных культур с помощью двух и более каналов позволяет ставить вопрос об идентификации культур по диаграммам типа “ $T_{я(K_a)} = f(T_{я(X)})$ ” или “ $T_{я(K_a)} - T_{я(X)} = f(\theta)$ ”. Как показано в работах [16] и [22], на таких графических плоскостях удается растянуть области концентрации экспериментальных точек в некие кластеры для различных типов сельскохозяйственных культур. Такой же результат достигается при комбинации активных и пассивных систем.

Перейдем к анализу полученных сезонных зависимостей. Отметим, что в нашем случае кривые $T_{я}/T_0$ в большей степени, чем во многих других работах, повторяют сезонный ход W и M . Впрочем аналогичная ситуация наблюдалась в работе [21]. Так, вычисленные нами коэффициенты корреляции (0.72–0.83) практически совпали с приведенными выше значениями. Следует отметить, что найденные значения коэффициентов корреляции несколько превышают ожидаемые для указанных физических процессов. Одним из объяснений этого результата может быть недостаточно полное статистическое представление экспериментальных данных (неполный сезон наблюдений и, возможно, неучтенные погрешности измерений объемных параметров растений).

Наиболее интересная особенность графиков сезонного хода $T_{я}$ — непривычное соотношение между радиотепловым излучением от массива при вертикальной ($T_{яV}$) и горизонтальной ($T_{яH}$) поляризациях. Надежно зафиксировано, что $T_{яH}$ превышает $T_{яV}$ хотя бы на несколько градусов. Ранее мы никогда не наблюдали такого соотношения при регистрации радиотеплового излучения от других природных сред: почвы (в данном эксперименте и в работе [23] при $\lambda = 5 \text{ мм}$); снега [24]; пресного [25] и морского льда [26]. В нашем эксперименте это явление наблюдалось только в период колошения, в другое время сохранялось соотношение: $T_{яV} > T_{яH}$. Это видно на левой части рис. 4 (наши наблюдения начались еще на стадии цветения растений), а также на правой: как только был срезан слой колосьев (с начала жатвы), но оставлена нижняя часть стерни, сквозь которую легко просматривалась почва, соотношение $T_{яV} > T_{яH}$ восстановилось. Аналогичная ситуация зафиксирована для овса в работе [19]. Можно ожидать, что такое явление наблюдается для всех злаковых культур. Оно было отмечено в работах по изучению радиотеплового излучения пшеницы [27], люцерны [28], причем в них поляризационная инверсия наблюдалась на других частотах микроволнового диапазона, и в радиолокационных экспериментах голландских исследователей при $\lambda = 3 \text{ см}$ для этих же культур [29]. По-ви-

димому, поляризационная инверсия связана с тем, что в период колошения основным поглощающим (и отражающим) элементом злаковых культур становятся не стебли, а верхние листья и колосья, которые по мере набора массы принимают горизонтальное положение, что особенно характерно для овса. Но такая трактовка не объясняет наличие поляризационной инверсии в опытах с люцерной [27]. В этом случае она связана с какими-то другими особенностями в строении этой культуры. В целом, это явление требует дальнейших исследований.

Выявленные в настоящей работе особенности радиотеплового излучения пшеничного массива – очень высокое значение $T_{я}/T_0 = 0.96 \div 0.99$ для пшеничных полей (см. рис. 5) и близкие значения $T_{яV} \approx T_{яH}$ – были подтверждены в работах [16-18, 30] в ходе накопления банка данных нормированных яркостных температур $T_{я}/T_0$ различных сельскохозяйственных культур, в том числе пшеничных полей. При выполнении этих работ были использованы многоканальные бортовые и наземные системы радиометров (*L*-, *C*-, *X*- и *Ka*-диапазонов) на вертикальной и горизонтальной поляризациях при надириных углах $10 \div 40^\circ$.

Сопоставление с расчетными значениями

Для длинноволновых диапазонов *P*, *L* и *C*, где растительные покровы достаточно прозрачны, $\tau \ll 1$, а размеры их элементов $d_{\text{раст}} \ll \lambda$ (релеевский случай), можно воспользоваться известными моделями водного облака [31] или поглощающего диэлектрического слоя [32] и следующим выражением для коэффициента поглощения:

$$\alpha = \frac{4\pi}{\lambda} \sqrt{\varepsilon''_{\text{раст}}}, \quad (1)$$

где $\varepsilon''_{\text{раст}}$ – мнимая часть комплексной диэлектрической проницаемости растительного покрова. В *X*- и особенно в *Ka*-диапазоне, где значение параметра $kd_{\text{раст}}$ ($k = \frac{2\pi}{\lambda}$) и ослабление τ возрастают до нескольких единиц, становится обязательным учет многократного

рассеяния. Это приводит к значительным вычислительным трудностям. Расчетные модели для такого случая очень сложны и продолжают разрабатываться. Они базируются на законе сохранения энергии излучения, из которого в применении к данному случаю вытекает следующее соотношение между $T_{я}/T_0$ и коэффициентом рассеяния (отражения) во всех направлениях r_λ :

$$T_{я}/T_0 = 1 - r_\lambda. \quad (2)$$

Для сред с плоской границей раздела (например, почвы) r_λ вычисляются по формулам Френеля, в которые теперь принято включать поправки на шероховатость почвы [33] и на деполяризацию шероховатостями [34]. Для тел сложной формы (для растительности в том числе) в качестве r_λ приходится вычислять интегральные бистатистические сечения рассеяния σ_{pq}^0 для каждого их элемента в зависимости от его диэлектрических свойств, угла ориентации θ и геометрической формы [16]:

$$r_\lambda(\theta) = \frac{1}{4\pi} \int_0^{2\pi} \int_0^{\pi/2} \sum_{p=1}^2 \frac{\sigma_{pq}^0(\theta, \theta_s, \phi_s)}{\cos \theta} \sin \theta_s d\theta_s d\phi_s, \quad (3)$$

где $p = 1, 2$ для вертикальной и горизонтальной поляризации соответственно. Далее нормированную яркостную температуру вычисляют по формуле (2). Физический смысл выражения (3) состоит в том, что оно описывает часть потока мощности единичной плотности, падающего под углом θ на растительный покров, которая рассеивается в верхнее полупространство. Точное математическое описание реальных растений невозможно, поэтому разработчики наиболее приемлемых на сегодняшний день расчетно-теоретических моделей [16, 34] пошли по пути разумного их упрощения. В этих моделях реальные растения заменяют искусственными, состоящими из диэлектрических тел простейшей формы – дисков и цилиндров. Для них сечения бистатистического рассеяния были вычислены ранее с

помощью точных решений уравнений Максвелла. Особенно привлекательна модель, предложенная и развитая в работах [16, 28, 30, 35, 36]. По данным ее авторов, она пригодна почти для всех частот мм диапазона (до 85 ГГц), в то время как модель из работы [37] опробована лишь на частотах ниже 9 ГГц. Обе модели опираются на обширные численные расчеты, и их алгоритм пока недостаточно освещен в литературе. Поэтому сопоставим результаты наших измерений с расчетными значениями $T_{я\text{раст}}$, полученными из известного эвристического уравнения переноса излучения [17]:

$$\mu \frac{dT_{я\text{раст}}(\tau, \mu)}{d\tau} = -T_{я\text{раст}}(\mu) + (1 - \omega)T_0 + \frac{\omega}{2} \int_{-1}^1 P(\mu, \mu') T_{я\text{раст}}(\tau, \mu') d\mu', \quad (4)$$

где $\mu = \cos \theta$, θ – угол между направлением приема излучения и нормалью к слою; $\tau = \alpha_{\text{экт}} z$ – оптическая плотность; $\alpha_{\text{экт}} = \alpha_{\text{погл}} + \alpha_{\text{расс}}$ – коэффициенты ослабления, поглощения и рассеяния соответственно; ω – альbedo однократного рассеяния, $0 \leq \omega = \alpha_{\text{расс}} / \alpha_{\text{экт}} \leq 1$ (полагается, что не зависит от λ); $P(\mu, \mu')$ – индикатриса рассеяния (фазовая функция) излучения из направления μ в направление μ' .

По данным работы [17], для некоторых сильно поглощающих растительных покровов последнее слагаемое из уравнения (4) можно исключить без существенного ухудшения погрешности вычислений, даже для волн мм диапазона. Это объясняется двумя возникающими в этой ситуации физическими механизмами, каждый из которых ограничивает развитие процесса многократного рассеяния. Первый заключается в том, что большое поглощение в таких растительных покровах “отсекает” все длинные траектории прохождения излучения, которые характерны для лучей, рассеянных в боковых направлениях. Наличие бокового излучения в других (слабо поглощающих) средах обязательно привело бы в действие механизм многократного рассеяния. Второй механизм

имеет следующую физическую природу. При переходе к мм диапазону величина параметра $kd_{\text{раст}}$ достигает единицы и более высоких значений, что типично для области Ми. Так, на волне 8 мм для пшеничных стеблей $\sqrt{\epsilon_{\text{раст}}}(\pi d/\lambda) = 4$. Как известно [38, 39], в этом случае в индикатрисах рассеяния возникает узкий длинный передний лепесток (см. [16], а также [36, 40]). В работе [41] его аппроксимируют выражением $2f\sigma(\mu - \mu')$, где f – доля рассеяния вперед, а σ – функция Дирака. Это приводит к существенному снижению рассеяния в боковых направлениях и ограничивает развитие многократного рассеяния и рост величины альbedo (по мнению авторов [17], $\omega \sim 0.1$). Кроме того, концентрация рассеянной энергии в узком конусе в направлении на приемник приводит к “просветлению” среды. Далее, по мнению авторов [17], одновременно с исключением последнего слагаемого из уравнения (4) необходимо заменить $\omega\tau$ на $\omega\tau'$ в виде, рекомендованном в работе [41], – как результат действия вышеуказанных обстоятельств:

$$\tau' = \tau(1 - f\omega); \quad \omega' = \omega(1 - f)/(1 - f\omega).$$

Теперь уравнение (4) преобразуется к виду:

$$dT_{я}/d\tau' = -T_{я} + (1 - \omega')T_0. \quad (5)$$

Решение уравнения (5) имеет вид [38]:

$$T_{я\text{раст}} = \left(1 + \frac{R_{\text{почвы}}}{L}\right)(1 - \omega')\left(1 - \frac{1}{L}\right)T_{\text{раст физ}} + \frac{1 - R_{\text{почвы}}}{L}T_{\text{почвы физ}}, \quad (6)$$

где $L = e^{\tau/\mu}$, $R_{\text{почвы}}$ – коэффициент отражения от почвы, $T_{\text{раст физ}}$ и $T_{\text{почвы физ}}$ – температуры растительного покрова и почвы соответственно.

Уравнение (6) позволяет вычислить $T_{я\text{раст}}$ растительного массива, если измерить $T_{я}$ по-

чвы радиометром (либо $R_{\text{почвы}}$ скаттерометром), ослабление в слое α – приемником на просвет, физическую температуру сред – термометром и воспользоваться полученным в работе [17] значением альбедо $\omega' \leq 0.1$, пригодным, по мнению авторов этой работы, для густых сельскохозяйственных культур (люцерны, сои, злаковых) в X - и Ka -диапазонах. В данном случае использовано отдельно измеренное нами значение при $\lambda = 8$ мм и $\theta = 50^\circ$:

$$T_{\text{я почвы}}/T_0 = 1 - R_{\text{почвы}} = 0.95.$$

Откуда $R_{\text{почвы}} = 0.05$. Но эти величины не играют существенной роли, так как радиотепловое излучение почвы практически не способно достигать регистрирующего прибора (радиометра) сквозь пшеничный массив в силу большой оптической плотности последнего. Поэтому второе слагаемое в уравнении (6) может быть отброшено и это уравнение переходит в уравнение (5). Решение последнего имеет вид:

$$T_{\text{я раст}}(\lambda, \theta) = (1 - e^{-\alpha h / \cos \theta}) T_0.$$

Полученное из него значение $T_{\text{я раст}}/T_0 = 0.94$ для $h = 1.1$ м, $\theta = 50^\circ$ и $\alpha = 5.18$ нп/м близко к измеренным величинам, представленным на рис. 3-5.

Анализ и сопоставление результатов измерений погонного ослабления миллиметровых волн в пшеничном покрове

Напомним, что полученное итоговое значение коэффициента ослабления вертикально поляризованного излучения в Ka -диапазоне $\gamma_{\text{изм}} = 22.5$ дБ/м. Такой же величины он должен быть и для горизонтальной поляризации, в отличие от работы [42] для X -диапазона, где разница между ними порядка 5 дБ. Объясняется это тем, что в мм диапазоне волн вели-

чина отношения $d_{\text{раст}}/\lambda$ иная, что и приводит, по мнению авторов работы [43], к экспериментально наблюдавшемуся в их измерениях сближению коэффициентов ослабления на обеих поляризациях. Более того, замедляется рост γ с увеличением частоты [44-46]. Так, ослабление в кронах деревьев и сельскохозяйственных культурах при $\lambda = 3$ мм лишь слегка превышало ослабление при $\lambda = 8$ мм. По-видимому, показатель степени в формулах частотной зависимости (см. далее (7) из [17] и нижеприведенную формулу (8) из работы [43]) по мере накопления экспериментальных данных будет снижен.

Ранее отмечалось, что ослабление радиоволн в растительном массиве в основном связано с количеством запасенной в нем воды (W (кг/м²) или M (кг/м³)), но на практике удобнее связывать τ с количеством полной биомассы Q . При этом в L - и S -диапазонах предпочитают сопоставлять экспериментальные данные с линейной аппроксимацией этой взаимосвязи $\tau' = A Q$, а в X - и Ka -диапазонах, по мнению авторов [17], лучше подойдет более слабая зависимость:

$$\tau' \approx \lambda^{-\frac{1}{2}} \ln(1 + Q). \quad (7)$$

Если сопоставить измеренный нами коэффициент ослабления в пшеничном слое с рассчитанным по формуле (7), то при $\lambda = 8$ мм получим коэффициент пропорциональности 13.2. Однако, согласно рис. 5, возможность применения этой формулы во всем мм диапазоне маловероятна и поэтому для более широкого частотного диапазона нами не исследовалась.

Результатов аналогичных измерений либо расчетов в доступных источниках нам найти не удалось, хотя понятно, что полной аналогии вообще быть не должно, так как в подобных измерениях не бывает двух одинаковых сезонов и географических условий, и вопрос должен решаться статистически по большому массиву данных. Поэтому в качестве одного из возможных вариантов сравнения было выбрано сопоставление на одном графике наших

данных и литературных данных по $\gamma_{изм}$ для близких диапазонов волн и некоторых похожих по степени загущенности видов растительности (густые кроны деревьев, густые массивы сои и люцерны) (см. рис. 6). Наиболее интересны результаты измерений γ для пшеницы, приведенные в работе [42]: $\gamma_{10.2ГГц}^V = 18.5$ дБ/м и $\gamma_{4.75ГГц}^V = 9.5$ дБ/м. Эти значения вполне укладываются в логику частотного хода затухания, отраженную в работе [43] для древесных крон в мм диапазоне волн:

$$\gamma(f_2) = \gamma(f_1)0.5(f_2/f_1)^{0.75} \quad (8)$$

Если это соотношение применить к злаковым культурам, то пересчет результата для нашей частоты дает 23.1 дБ/м, что близко к $\gamma_{изм}$ ($\lambda = 8$ мм). Пересчет по формуле (7) не обеспечил подобного совпадения.

Проведем сопоставление с приведенными на рис. 6 литературными данными для древесной растительности, главным образом для $\lambda = 8$ мм и вертикальной поляризации. По результатам измерений [43], в этом диапазоне волн среднее затухание в кронах деревьев составляет 16 дБ/м; по данным другой работы,

затухание в кроне густого хвойного дерева Arbor Vitae (имеет вид пирамидальной туи) равно $\gamma^V = 16.5$ дБ/м, $\gamma^H = 15.6$ дБ/м [45]; в кроне фикуса $\gamma^V = 28.5$ дБ/м, $\gamma^H = 27.1$ дБ/м [47, 48]; в кроне густой канадской ели $\gamma^V = 37$ дБ/м, $\gamma^H = 43$ дБ/м [47].

Обширные данные о затухании мм волн в кронах более чем 50 видов деревьев получены в работе [45]. Оказывается, что затухание при $\lambda = 3$ мм незначительно превышает затухание при $\lambda = 8$ мм и может достигать $\tau = 60$ дБ на одну крону диаметром 7 м (для клена). Как видно из рис. 6, значения всех приведенных удельных коэффициентов ослабления близки (или несколько выше) к полученному $\gamma_{изм}$ ($\lambda = 8$ мм).

Для сопоставления измеренного нами значения $\gamma_{изм} = 22.5$ дБ/м с расчетными $\gamma_{расч}$ для Ka-диапазона волн необходимо использовать теоретические модели, учитывающие многократное рассеяние [16, 34]. Не располагая таковыми, можем привести лишь верхнюю (предельную) оценку $\gamma_{расч пред}$ по формуле (1) либо оценку из работы [42], полученную при замене растительного покрова диэлектрическим поглощающим слоем без рассеяния (что приводит к завышенным значениям $\gamma_{расч пред}$). Для такой оценки требуется выполнить следующую последовательность вычислений: определить среднее значение ϵ'' ($\lambda = 8$ мм) пшеничных стеблей и листьев по результатам измерений [16, 49] и вычислений $\epsilon''(w)$ по формуле из [2]; преобразовать $\epsilon''_{ср раст}$ растительных элементов в $\epsilon''_{раст покрова}$ растительного покрова, учитывая объемные доли стеблей и листьев на исследуемом участке поля; воспользоваться формулами для $\epsilon''_{эфф покрова}$ из [9] либо из [2]. В итоге получается $\gamma_{расч пред} \leq 51.4$ дБ/м и $\gamma_{расч пред} \leq 75.3$ дБ/м, соответственно. Расчеты ослабления по формулам работы [42] на частоте 35 ГГц дают примерно такие же результаты.

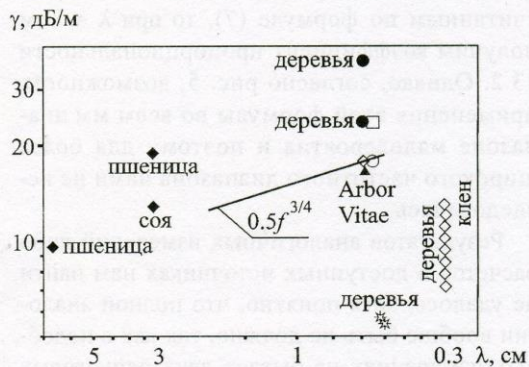


Рис. 6. Удельные коэффициенты ослабления вертикально поляризованного излучения для различных типов покровов:

▲ – [43], △ – [46], ● – [47], ◆ – [42], ◇ – [45], ○ – [17], □ – авторы настоящей статьи

Выводы

Проведены сезонные измерения угловых и поляризационных радиотепловых характеристик злаковых культур, а также коэффициента ослабления излучения в растительном слое

в *Ka*-диапазоне волн. Полученное экспериментальное значение $\gamma_{\text{изм}}$ составило 22.5 дБ/м.

В результате проведенных исследований показано, что по уровню излучения пшеничный массив близок к абсолютно черному телу, причем его яркостная температура изменяется в очень малом диапазоне на протяжении всего вегетационного периода, при разных углах падения излучения и поляризациях.

Показано, что с точки зрения возможности дистанционного определения биометрических параметров сельскохозяйственных культур с большой биомассой (количества зеленой массы на единицу площади и запасенной влаги на единицу объема массива, прогноза урожайности и др.) желательны измерения в *Ka*-диапазоне волн дополнять измерениями в *X*- и в определенной степени, *L*- и *C*-диапазонах.

Найдено, что в период колошения в пшеничном массиве значения яркостной температуры при горизонтальной поляризации немного выше, чем при вертикальной (поляризационная инверсия), причем это соотношение сменяется привычным вне указанного периода. Хотя такому явлению пока еще нет должного объяснения, возможно, в результате дальнейших исследований его удастся использовать как характерный признак стадии созревания, а другое явление – заметный спад яркостной температуры в конце срока созревания – как признак готовности к жатве.

Литература

1. H. T. Chuah, W. L. Kung. Remote Sensing. Environ. **50**, No. 3, 1994, pp. 212-220.
2. R. K. Moore, A. K. Fung, F. T. Ulaby. Microwave Remote Sensing, Active and Passive. New York, Artech House, 1986, v. 1-3, 2162 pp.
3. L. Tsang, J. A. Kong, R. T. Shin. Theory of Microwave Remote Sensing. New York, Wiley, 1985.
4. J. A. Kong, L. Tsang. Scattering of EM waves. New York, Wiley, 2000, v. 1; 2001, v. 2.
5. A. K. Fung. Microwave Scattering and Emission Models and their Applications. Boston, MA, Artech House, 1994.
6. P. Pampaloni (Ed.). Microwave Radiometry and Remote Sensing Applications. VSP, Utrecht, The Netherlands, 1989.
7. B. A. M. Bouman. Linking X-band Radar Backscattering and Optical Reflectance with Crop Growth Models. Ph. D. Thesis, 1991, 169 pp.
8. А. Е. Башаринов, А. С. Гурвич, С. Т. Егоров. Радиоизлучение Земли как планеты. Москва, Наука, 1986, 186 с.
9. А. М. Шутко. Радиометрия водной поверхности и почвогрунтов. Москва, Наука, 1986, 188 с.
10. А. А. Chukhlantsev. Microwave Emission and Scattering from Vegetation Canopy. J. Electromagn. Waves Applicat. 1992, **6**, No. 8, pp. 1043-1068.
11. B. D. Zamaraev, Y. F. Vasiliev, V. L. Kostina, A. N. Roenko, F. V. Kivva. Proc. IGARSS'95, USA.
12. B. D. Zamaraev, Yu. F. Vasiliev, V. L. Kostina, A. N. Roenko. Water content influence on scattering properties of vegetation cover. Proc. IGARSS'96, USA, Nebraska.
13. М. В. Зубец, Т. Ю. Щеголева, В. Г. Колесников. Применение волн ММ диапазона в сельском хозяйстве. Киев, Аграрна наука, 1996, 162 с.
14. С. А. Шило, С. Е. Яцевич. В сб. Радиофизические методы и средства для исследования окружающей среды в ММ диапазоне волн. Киев, Наукова думка, 1988, с. 31-38.
15. Н. А. Есепкина, Ю. Н. Корольков, Ю. Н. Парейскис. Радиотелескопы и радиометры. Москва, Наука, 1973, 415 с.
16. P. Ferrazzoli. J. Electromagn. Waves Applicat. 1995, **90**, No. 3, pp. 393-406.
17. P. Pampaloni, S. Paloscia. IEEE Trans. Geosci. Remote Sensing. 1986, **24**, No. 6, pp. 900-905.
18. P. Ferrazzoli, G. Luzzi, S. Paloscia, P. Pampaloni. IEEE Trans. Geosci. Remote Sensing. 1989, **27**, No. 11, pp. 772-776.
19. Ch. Matzler. Remote Sensing Environ. 1990, **31**, No. 3, pp. 161-173.
20. S. Paloscia, P. Pampaloni. Remote Sensing Environ. 1992, **40**, No. 1, pp. 15-21.
21. Shou Fang Liu, Yuei-An-Lion, Wen-Jun Wang, J. P. Wigneron. IEEE Trans. Geosci. Remote Sensing. 2002, **40**, No. 6, pp. 1260-1268.
22. G. Macelloni, S. Paloscia, P. Pampaloni, R. Ruisi. IEEE Trans. Geosci. Remote Sensing. 2001, **39**, No. 11, pp. 2507-2513.
23. H. Yamasaki, J. Awaka, A. Takanashi, K. Okamoto. IEEE Trans. Geosci. Remote Sensing. 1992, **30**, No. 4, pp. 761-765.
24. Ю. И. Малышенко, С. Б. Беспечный. В сб.: Радиофизические методы и средства для исследования окружающей среды в ММД. Киев, Наукова думка, 1988, с. 3-8.
25. Ю. И. Малышенко, И. Х. Ваксер, А. С. Левда. Исследование Земли из Космоса. 1982, №3, с. 95-102.

26. V. A. Komjak, Yu. I. Malyshenko. Telecommunications and Radio Engineering. 1997, **51**, No. 2-3, pp. 66-72.
27. S. Paloscia, P. Pampaloni. IEEE Trans. Geosci. Remote Sensing. 1988, **26**, No. 5, pp. 617-621.
28. P. Ferrazzoli, R. Guerriero, S. Paloscia, P. Pampaloni, D. Solimini. IEEE Trans. Geosci. Remote Sensing. 1992, **30**, No. 1, pp. 157-165.
29. B. A. M. Bouman, H.V.J. Van Kasteren. Remote Sensing Environ. 1992, **40**, No. 1, pp. 107-120.
30. P. Ferrazzoli, J.-P. Vigneron, L. Guerriero, A. Chanzy. IEEE Trans. Geosci. Remote Sensing. 2000, **38**, No. 6, pp. 2598-2607.
31. F. P. W. Attema, F. T. Ulaby. Radio Sci. **13**, No. 2, pp. 357-361.
32. F. T. Ulaby, A. Tavakoli, Th. B. A. Senior. IEEE Trans. Geosci. Remote Sensing. 1987, **5**, No. 6, pp. 714-724.
33. B. J. Choudhury, N. J. Schmugge, R. W. Newton. J. Geophys. Res. 1979, **84**, pp. 5699-5706.
34. J. R. Wang, B. J. Choudhury. J. Geophys. Res. 1981, **86**, pp. 5277-5282.
35. P. Ferrazzoli, G. Luzi, S. Paloscia, D. Solimini. J. Electromagn. Waves Applicat. 1991, **5**, No. 2, pp. 175-193.
36. P. Ferrazzoli, L. Guerriero, D. Solimini. J. Electromagn. Waves Applicat. 1991, **6**, pp. 179-191.
37. H. T. Chuah, M. S. Tan. J. Electromagn. Waves Applicat. 1992, **6**, No. 7, pp. 799-852;
38. К. Борен, Д. Хаффман. Поглощение и рассеяние света малыми частицами. Москва, ИЛ, 1986, 664 с.
39. Ю. И. Малышенко. Труды X-й Всесоюзной конференции по распространению радиоволн. Иркутск, 1972; Москва, Наука, 1972, том 4, с. 81-85.
40. D. R. Brunfeld, F. T. Ulaby. IEEE Trans. Geosci. Remote Sensing. 1984, **22**, No. 6, pp. 520-524.
41. T. Mo, B. J. Choudhury, T. J. Schmugge, J. R. Wang, T. J. Jackson. J. Geophys. Res. 1982, **87**, pp. 11229-11237.
42. F. T. Ulaby, E. A. Wilson. IEEE Trans. Geosci. Remote Sensing. 1985, **23**, No. 5, pp. 746-753.
43. N. C. Currie, F. B. Dyer, E. E. Martin. G-AP Int. Symp., Amherst, New York, 1976, pp. 535-538.
44. A. Y. Nashashibi, K. Sarabandi, P. Frantzis, P. D. DeRoo, F. T. Ulaby. IEEE Trans. Geosci. Remote Sensing. 2002, **40**, No. 8, pp. 1889-1892.
45. A. Y. Nashashibi, F. T. Ulaby, P. Frantzis, R. D. De Roo. IEEE Trans. Geosci. Remote Sensing. 2002, **40**, No. 2, pp. 298-304.
46. F. K. Schwing, E. J. Violette, R. H. Espeland. IEEE Trans. Geosci. Remote Sensing. 1988, **26**, No. 3, pp. 355-367.
47. F. T. Ulaby, VanDeventer, J. A. East, T. F. Haddock. IEEE Trans. Geosci. Remote Sensing. 1988, **26**, No. 3, pp. 229-243.
48. T. E. VanDeventer, J. R. East, F. T. Ulaby. IGARSS'87, pp. 827-833.
49. T. J. Schmugge, T. J. Jackson. IEEE Trans. Geosci. Remote Sensing. 1992, **30**, No. 4, pp. 757-760.

Investigating the Millimeter-Wave Thermal Emission of Wheat Canopy for Remote Sensing Applications

Yu. I. Malyshenko, A. N. Roencko

The *Ka*-band measured thermal features of crop canopy, such as seasonal, angular and polarization dependencies, and also linear attenuation of the winter wheat canopy are presented. The phenomenon of polarization inversion has been noticed which consists in that the wheat canopy full of ears shows its brightness temperature slightly higher at *H*-polarization than at *V*-polarization. The potential of multichannel sensing a thermal emission of vegetation cover for measuring its biometrical parameters is shown.