Зондирование в оптическом диапазоне

В оптическом диапазоне применяют как пассивные, так и активные методы ДЗ.

Пассивные методы - информативный сигнал представляет собой отраженное солнечное излучение. Собственным излучением атмосферы и подстилающей поверхности пренебрежимо мало.

Активные методы - информативным сигналом является отраженное монохроматическое излучение лидарных систем.

В настоящее время в методах ДЗ из космоса основную роль играют **пассивные** методы.

Основной характеристикой взаимодействия излучения в оптическом диапазоне с зондируемой средой является **коэффициент спектральной яркости** (КСЯ), так как экспериментально измеряют именно коэффициенты яркости, а не коэффициенты отражения.

Коэффициент спектральной яркости ρ - величина, характеризующая пространственное распределение спектральной яркости отражающей поверхности, равная отношению яркости данной поверхности в заданном направлении $B(\lambda)$ к яркости идеально рассеивающей поверхности $B_0(\lambda)$ с единичным коэффициентом отражения и освещенной так же, как и данная поверхность

$$\rho(\lambda)= B(\lambda)/B_0(\lambda).$$

В качестве идеального рассеивателя обычно принимают поверхности, обладающие равномерно рассеивающим отражением для всех длин волн спектра, например, пластинки, покрытые барием, гипсовые пластинки и т.п.

Зондирование водных объектов

При отражении света водной средой световой поток, восходящий от водной поверхности, складывается из двух составляющих:

- светового потока, отраженного на границе раздела воздух-вода;
- светового потока, восходящего из-под водной поверхности.

Первая составляющая световою потока определяется коэффициентом отражения *Rг*, который в оптике моря называется **коэффициентом зеркального отражения** (КЗО), а вторая составляющая - коэффициентом отражения *Rс,* который называется **коэффициентом диффузного отражения** (КДО).

Величина КЗО определяется свойствами и состоянием водной поверхности. Величина КДО, в свою очередь, зависит от концентраций различных растворенных и взвешенных в воде веществ.

Таким образом, величина светового потока, восходящего от водной поверхности, определяется:

- наличием нефтяных пленок, их толщиной;
- поверхностными образованиями (пеной, ряской и т.п.);
- концентрацией взвешенных веществ и их вертикальным распределением.

Зондирование поверхности суши

При использовании **пассивных методов** ДЗ в оптическом диапазоне восходящий световой поток представляет собой излучение, **отраженное на границе раздела** атмосфера-подстилающая поверхность. **Подповерхностное** проникновение света практически **отсутствует**.

Коэффициент отражения света определяется:

- коэффициентом преломления;
- коэффициентом поглощения подстилающей поверхности;
- микрорельефом подстилающей поверхности.

Поверхность суши отличается большим разнообразием типов подстилающей поверхности, характеризующихся различными **интегральными коэффициентами яркости**, и, в еще большей степени, различными **спектральными зависимостями КСЯ**, обусловленными, в первую очередь, специфическими спектрами поглощения различных объектов.

Однако для ряда различных типов подстилающей поверхности значения **интегральных КЯ** могут практически совпадать, поэтому надежная идентификация таких объектов возможна лишь на основе использования:

- структурных дешифровочных признаков;
- многозональной съемки.

Среди различных типов поверхности суши для географических условий Украины условно выделяют несколько основных классов:

- почвы и минералы;
- растительность
- снег.

<u>Почвы и минералы</u>

Основные оптически активные компоненты почв:

- гумусовые вещества
- окислы железа;
- светлоокрашенные минеральные соединения.

Гумусовые вещества характеризуются **низкой** отражательной способностью. Это приводит к снижению интегральных значений КЯ при увеличении концентрации гумуса.

Для **окислов железа** также характерны **низкие** значения КЯ.

Основные породообразующие **минералы увеличивают** интегральный КЯ.

КСЯ почв зависит не только от их **состава**, но также и от **влажности**, **текстуры** и **структуры** поверхности.

Зависимость КСЯ почв от **влажности** обусловлена двумя эффектами:

- **уменьшением показателя преломления** (для почвы n=1,5...1,7, а для воды n=1,2...1,3);

- увеличением показателя поглощения.

Оба эффекта приводят к **уменьшению** КСЯ.

Текстура почвы характеризуется соотношением в ней частиц различных размеров:

- глины (диаметр d<0,002 мм);

- пыли (d=0,002...0,050 мм);

- песка d=0,05...2 мм).

Увеличение содержания в почве частиц меньших размеров приводит к **увеличению** КСЯ, обусловленному увеличением многократного внутреннего рассеяния света.

Влияние **микрорельефа** поверхности на величину КСЯ обусловлено изменением площади, занимаемой тенями. **Уменьшение** шероховатости поверхности приводит к **уменьшению** доли этой площади и, следовательно, к **увеличению** КСЯ.

Растительный покров

Отражательные характеристики растительного покрова зависят от:

- оптических свойств фитоэлементов (листьев, стеблей, веток, стволов, цветов, плодов);

- архитектуры растительного покрова (формы, взаимного расположения и ориентации фитоэлементов);

- коэффициента проективного покрытия (количества растительности на единицу площади).

Основной вклад в формирование КСЯ сплошного растительного покрова вносит **отражение света листьями**.

Архитектура растительного покрова оказывает влияние главным образом на угловое распределение восходящего излучения. Основным фактором является количество слоев листьев. Увеличение числа слоев приводит к снижению интегрального КСЯ вследствие затенения нижних слоев верхними.

При низких **коэффициентах проективного покрытия** КСЯ растительного покрова также зависит от отражательных характеристик **почвы**.

Снег и лед

Отражение света снегом определяется процессами:

- поглощения света водой;

- отражением света на поверхности;

- рассеянием внутри зерен.

Основные факторы, влияющие на КСЯ снега:

- влажность;

- загрязненность

- размер зерен;

- плотность снега.

Увеличение **влажности** снега сопровождается увеличением размера зерен и плотности снега. При этом КСЯ снега уменьшается вследствие увеличения поглощения водой и уменьшения роли многократного рассеяния.

Загрязненность снега также приводит к уменьшению КСЯ. Существует зависимость между уменьшением зональных яркостей загрязненного снежного покрова и концентрациями в нем некоторых загрязняющих веществ.

Спектральный ход КСЯ **льда** аналогичен спектральной зависимости КСЯ **снега**, однако для льда характерны более низкие значения КСЯ и более динамичное уменьшение КСЯ при увеличении загрязненности.

Атмосфера

Атмосферу можно рассматривать как среду, состоящую из смеси газов и водяного пара со взвешенными в ней частицами (частицы пыли, водяные капли и др.) - так называемым аэрозолем.

Основные газовые составляющие атмосферы - азот (78%) и кислород (21%).

В значительно меньших концентрациях присутствуют и другие газы - так называемые **малые газовые составляющие**, например сернистый газ, пары азотной кислоты, аммиак, двуокись азота.

Задача мониторинга состояния атмосферы и атмосферных явлений по данным ДЗ из космоса тесно связана с задачей учета влияния атмосферы при дистанционном зондировании из космоса различных видов подстилающей поверхности, так как в обеих зада-

чах необходимо рассмотрение механизма взаимодействия электромагнитного излучения с атмосферой.

Атмосфера оказывает двоякое влияние на данные ДЗ из космоса.

С одной стороны, влияние атмосферы приводит к изменению условий освещения подстилающей поверхности.

С другой стороны, атмосфера трансформирует электромагнитное излучение при его прохождении, от источника к подстилающей поверхности и обратно.

В оптическом диапазоне взаимодействие света с атмосферой определяется процессами **поглощения** различными газовыми составляющими и аэрозолем, молекулярного и аэрозольного **рассеяния** света. В видимом диапазоне собственным излучением атмосферы можно пренебречь.

Поглощение света носит селективный по спектру характер, т.е. спектр поглощения имеет относительно узкие максимумы - полосы поглощения, соответствующие различным газовым составляющим.

Рассеяние света на частицах обуславливает возможность идентификации на космических снимках оптического диапазона различных дымовых пылевых загрязнений атмосферы:

- промышленные выбросы в атмосферу;
- дымы от лесных пожаров;
- вулканические извержения;
- пылевые бури.

Дымовые шлейфы на снимках видимого диапазона выглядят, более светлыми, чем подстилающая поверхность.

Облачность является **главным неустранимым недостатком** использования методов ДЗ в оптическом диапазоне. В то же время ряд задач, связанных с изучением облачности, наиболее эффективно решают именно в данном спектральном диапазоне.

Зондирование в ИК-диапазоне

В отличие от видимого диапазона в ИК-диапазоне при использовании пассивных методов ДЗ возможна регистрация не только **отраженного** солнечного излучения, но и **собственного** теплового излучения подстилающей поверхности и атмосферы.

Как следует из теоремы взаимности обобщенного закона Кирхгофа, **коэффициенты излучения** k и **отражения** R связаны соотношением:

$$\mathrm{k} \cdot \mathrm{B}(\mathrm{T}) = (1 - \mathrm{R}) \cdot \mathrm{B}(\mathrm{T}).$$

Откуда следует, что изменение **отражательной способности** среды приводит к изменению ее **излучательной способности**, причем излучательная способность увеличивается при уменьшении отражательной и наоборот.

В случае, когда ЭМИ проникает под поверхность среды, при расчете коэффициента отражения необходимо учитывать не только отражение **на границе раздела** сред, но и **объемное отражение** средой.

Регистрируя в пассивных методах ДЗ собственное излучение среды, можно получить дополнительную информацию о свойствах объектов, а также вести наблюдения за ними в ночное время, что является одним из существенных **преимуществ** использования ИК-диапазона.

Недостатки:

- невозможность наблюдения за объектами, закрытыми облаками;

- более низкое по сравнению с оптическим диапазоном пространственное разрешение;

- ограниченность использования активных методов при ДЗ из космоса.

Зондирование водных объектов

Высокие значения показателя поглощения чистой водой в ИК-диапазоне обуславливают незначительную глубину проникновения излучения под водную поверхность, поэтому восходящий **отраженный поток** излучения и **собственное излучение** водной среды формируются в узком приповерхностном слое глубиной до 0,02 мм.

По этой причине интенсивности **отраженного** и **собственного** излучения зависят в основном от различных **образований** на поверхности воды.

Собственное излучение, кроме того, в значительной степени зависит от термодинамической **температуры** поверхностного слоя воды. Эта зависимость определяется функцией Планка и лежит в основе определения температуры поверхностного слоя воды.

Характер влияния **волн** на коэффициент отражения в ИК-диапазоне зависит от угла наблюдения: при **малых** углах наблюдения коэффициент отражения **возрастает** с **увеличением** волнения, а коэффициент излучения соответственно **убывает**; при **больших** углах наблюдается **обратная** картина.

На отражательные свойства воды также оказывает влияние и

ее **соленость**, что может быть использовано для различения солёной и пресной вод.

Зондирование поверхности суши

Почвы и минералы

Характер зависимостей коэффициента яркости от свойств почв аналогичен характеру зависимостей в оптическом диапазоне. Причем увеличение влажности приводит к более динамичному изменению КЯ.

Сильное влияние на интенсивность собственного излучения почв оказывает их температура.

Растительный покров

Спектральные зависимости КЯ и коэффициента излучения растительного покрова аналогичны зависимостям в оптическом диапазоне.

Основным фактором, влияющим на отражательные и излучательные характеристики **фитоэлементов**, является влагосодержание. В ИК-диапазоне для КЯ фитоэлементов характерны очень низкие значения, а для коэффициента излучения – напротив, значительно более высокие, чем в оптическом диапазоне. При обезвоживании растений КЯ возрастает.

Более значительным фактором является его термодинамическая температура. Наблюдение за этим фактором имеет большое значение для ряда сельскохозяйственных и экологических задач (выявление заболеваний растений, их поражение вредителями и др.).

Архитектура растительного покрова существенного вклада в формирование сигнала не вносит.

Снег

Ввиду **высоких** значений **показателя поглощения** воды в ИК-диапазоне для КСЯ снега характерны **очень низкие** значения.

Резкое уменьшение КСЯ снега в ИК-диапазоне по сравнению с оптическим обуславливает возможность идентификации **облачности** и **снега** на основе совместного использования снимков в этих диапазонах.

Излучагельная способность снега в ИК-диапазоне, напротив, приближается к **единице**, и, следовательно, **интенсивность** его собственного излучения определяется главным образом **термодинамической температурой**.

Атмосфера

При распространении ИК-излучения в атмосфере **процесс рассеяния** является существенным только при наличии **крупных** аэрозольных частиц. Вследствие этого при отсутствии облачности **прозрачность атмосферы** определяется практически только **поглощением** газовыми составляющими и аэрозольным поглощением, а яркость атмосферной дымки пренебрежимо мала.

Среди газовых составляющих атмосферы **основной вклад** в поглощение ИК-излучения вносят **водяные пары**, **углекислый газ** и **озон**.

Кроме того, в этом диапазоне имеются полосы поглощения некоторых важных (в задачах мониторинга) малых газовых составляющих: **метана**, **закиси азота**, **сернистого газа**, **азотной кислоты**, **аммиака**, **двуокиси азота**.

Зондирование в СВЧ-диапазоне

В СВЧ-диапазоне так же, как и в ИК-диапазоне, при исполь-

зовании методов ДЗ возможна регистрация как **отраженного**, так и **собственного** излучения подстилающей поверхности.

Активные методы

Источниками излучения являются радиолокаторы различных типов.

При применении активных методов зондирования интенсивность отраженного излучения, регистрируемого РЛС, зависит от:

- характеристик радиолокатора; - геометрических условий съемки;

- отражающих свойств подстилающей поверхности, характеризуемых **ЭПР** (**УЭПР**).

ЭПР и УЭПР зависят от **длины волны** излучения, **типа поляризации** и **угла визирования**.

Отражающие свойства поверхности (УЭПР) определяются степенью ее **шероховатости**, **диэлектрической проницаемостью** (ДП) и **поляризационными характеристиками** (СВЧ-излучение всегда поляризовано).

УЭПР в радиолокации аналогична КСЯ при оптическом зондировании.

Пассивные методы

Аппаратурой ДЗ регистрируется **собственное** СВЧ-излучение подстилающей поверхности.

Интенсивность регистрируемого излучения (как и в ИК-диапазоне) определяется **термодинамической температурой** поверхности и ее **излучательной способностью** (если пренебречь влиянием атмосферы).

Коэффициент излучения поверхности зависит от диэлектри-

ческой проницаемости зондируемой среды.

Как и в случае ИК-диапазона, увеличение коэффициента отражения означает уменьшение коэффициента излучения, и наоборот.

Основным **информационным параметром** при пассивной СВЧ-съемке (СВЧ-радиометрии) является **радиояркостная температура** $T_Я$. Так как в СВЧ-диапазоне с высокой степенью точности выполняется условие применимости закона Рэлея-Джинса $hc/(k\lambda T) << 1$.

$$Тя = \chi T.$$

Особенности

Излучательная способность и УЭПР различных объектов на подстилающей поверхности изменяются в значительных пределах.

Минимальные значения УЭПР наблюдаются у водных объектов в случае низкой минерализации и отсутствия волнения.

Максимальные значения УЭПР характерны для металлоемких сооружений (крыш домов, железобетонных зданий и др.), что характерно для урбанизированных территорий.

Зондирование водных объектов

Излучательные и **отражательные** свойства водной поверхности ($T_Я$ и УЭПР) зависят от комплексной **ДП** водной среды в поверхностном слое, а также от интенсивности и спектра **поверхностных волн**.

Основные факторы, влияющие на **ДП воды**:

- соленость (увеличение солености приводит к уменьшению УЭПР и увеличению *Тя*);

- температура;

- наличие поверхностных пленок и пенных образований.

ДП пены обратно пропорциональна концентрации воздуха.

ДП нефтяных пленок зависит от:

- возраста (с возрастом ДП увеличивается, что объясняется свойством нефтепродуктов абсорбировать влагу);

- типа нефтепродуктов (уменьшается при увеличении октанового числа, т.е. с уменьшением роли тяжелых фракций и плотности.

Зондирование поверхности суши

Почвы и минералы

Излучательные и отражательные свойства подстилающей поверхности зависят от ее ДП и структуры.

Основным фактором, влияющим на ДП **почв**, является **влажность**.

Основным фактором, влияющим на ДП **сухих почв и минеральных пород**, является их **плотность**.

Активные методы

УЭПР зависит в основном от влажности, текстуры и структуры поверхности почв. При заданной текстуре и шероховатости УЭПР линейно возрастаем с увеличением влажности.

Глубина проникновения СВЧ-излучения в почву, а, следовательно, и толщина слоя, формирующего отраженный поток СВЧ-излучения, **увеличивается** с **уменьшением влажности** почв и с **увеличением длины волны**. Это обуславливает возможность **подповерхностного** зондирования **сухих** грунтов в **дециметровом** диапазоне.

Максимальная глубина проникновения радиоволн под поверхность характерна для песчаных грунтов. Для сверхсухих районов **глубина** подповерхностного зондирования может достигать

нескольких метров.

Пассивные методы

На величину $T_я$ основное влияние оказывают **влажность** и **солёность** почв, причем радиометрические измерения на **различных** длинах волн СВЧ-диапазона позволяют **отделить** эффекты влажности и засоленности.

Для **неоднородно** увлажненных по глубине грунтов их излучательная способность, а, значит, и $T_я$, зависит от **вертикального профиля** влажности.

Растительность

Отражательные и излучательные свойства растительного покрова в основном определяются диэлектрическими свойствами фитоэлементов.

Активные методы

УЭПР растительного покрова, как и **ДП** его фитоэлементов, зависит, в основном от **влагосодержания**. Увеличение влагосодержания приводит к уменьшению УЭПР.

Пассивные методы

Основной вклад в радиояркостную температуру вносит восходящее излучение растительности. Как и ДП фитоэлементов, радиояркостная температура зависит в основном от влагосодержания. Увеличение влагосодержания приводит к возрастанию $T_я$.

Снег и лед

Отражательные и излучательные характеристики ***льда*** зависят от его ДП, неоднородности и структуры поверхности.

Диэлектрические свойства ледовых покровов зависят от:

- увлажнения;

- пористости;

- наличия солевых включений (ДП морского льда значительно выше ДП пресного, вследствие влияния солености воды).

Помимо влажности УЭПР и радиояркостная температура зависят также от размера кристаллов и толщины снежного покрова.

Неоднородность льда (увеличение концентрации включений) повышает роль внутреннего рассеяния, что приводит к уменьшению коэффициента излучения и возрастанию УЭПР.

Шероховатость поверхности льда увеличивает эффекты многократного рассеяния, что приводит к уменьшению УЭПР и увеличению коэффициента излучения.

Благодаря эффектам интерференции волн, отраженных от верхней и нижней границ слоя льда, в дециметровом диапазоне возможно определение его **толщины**.

Атмосфера

При отсутствии осадков рассеянием СВЧ-излучения в атмосфере можно пренебречь.

В дециметровом диапазоне (при $\lambda \geq 2$ см) можно пренебречь также и поглощением излучения в атмосфере. В этом случае атмосфера практически является прозрачной для СВЧ-зондирования.

В сантиметровом диапазоне (при $\lambda < 2$ см) необходимо учитывать поглощение капельками воды, водяным паром и кислородом.