

ДИСТАНЦИОННОЕ ЗОНДИРОВАНИЕ АТМОСФЕРЫ
И ПОДСТИЛАЮЩЕЙ ПОВЕРХНОСТИ

УДК 551.501

В.А. Селиванов, В.П. Будак

ОПТИМИЗАЦИЯ СПЕКТРАЛЬНОЙ ЧУВСТВИТЕЛЬНОСТИ
СИСТЕМЫ ДИСТАНЦИОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ АТМОСФЕРЫ
ПРИ НАБЛЮДЕНИИ В БЛИЖНЕМ УФ-ДИАПАЗОНЕ

Показано, что оптимальная по критерию максимума отношения сигнал-шум изображения зона спектральной чувствительности системы дистанционного зондирования поверхности Земли в ближнем УФ-диапазоне определяется в основном величиной и спектральным распределением помехи обратного рассеяния и составляет для нормальных условий наблюдения величину 35 нм.

Наблюдение поверхности Земли дистанционными средствами сквозь атмосферу сопровождается значительными фоновыми засветками, обусловленными рассеянием солнечного света в поле зрения приемника изображения. Наличие аддитивной фоновой составляющей во входном оптическом сигнале уменьшает контраст изображения и пороговую чувствительность системы наблюдения. В тех случаях, когда яркость помехи обратного рассеяния много больше яркости объекта, что особенно характерно для наблюдения в ближнем ультрафиолетовом (УФ) диапазоне спектра (0,3 ... 0,4 мкм) и коротковолновой части видимого спектра [1], регистрируемый сигнал наблюдается на фоне шумов, обусловленных флуктуацией фотонов фонового излучения (при незначительном уровне собственных шумов фотоприемника). Такой режим работы систем наблюдения получил название режим ограничения фоном (ОФ).

В режиме ОФ, когда параметры атмосферы (прозрачность, помеха обратного рассеяния) являются функциями длины волны, воздействие атмосферы на оптический сигнал можно рассматривать как результат введения в оптическую схему системы наблюдения спектрального светофильтра [2].

В связи с этим представляет интерес оптимизация светочувствительности системы дистанционного зондирования при изменении оптических параметров атмосферы путем выбора соответствующего спектрального диапазона наблюдения.

Рассмотрим спектральный интервал ближнего УФ, в котором влияние атмосферы на характеристики сигнала в пассивных системах наблюдения наибольшее [1].

Мерой эффективности выбора спектрального диапазона в режиме ОФ может служить фотонное отношение сигнал-шум (ОСШ) в плоскости преобразователя свет-сигнал системы наблюдения

$$\phi = \bar{N}_{об}(\lambda) / (\bar{N}_{об}(\lambda) + \bar{N}_{пор}(\lambda))^{1/2}, \bar{N}(\lambda) = t_n \bar{S}(\lambda) A, \quad (1)$$

где $\bar{N}_{об,пор}$ — квантовая экспозиция; t_n — время накопления; S — средняя интенсивность оптического сигнала; A — коэффициент пропорциональности, учитывающий воздействие оптической системы на световое поле и пространственные параметры элемента преобразователя свет-сигнал.

Переходя к фотометрическим величинам и опуская постоянный множитель (полагая спектральные оптические параметры системы неизменными), можно записать [3]

$$\phi = \frac{\int_0^{\infty} L_{об}(\lambda) T(\lambda) \tau_{\phi}(\lambda) \lambda d\lambda}{\left[\int_0^{\infty} (L_{об}(\lambda) T(\lambda) + L_{пор}(\lambda)) \tau_{\phi}(\lambda) \lambda d\lambda \right]^{1/2}}, \quad (2)$$

где $L_{об}(\lambda)$, $L_{пор}(\lambda)$, $T(\lambda)$ — спектральная яркость объекта, помехи обратного рассеяния и прозрачность атмосферы соответственно; $\tau_{\phi}(\lambda)$ — спектральное пропускание светофильтра системы.

Для определения оптимального спектрального диапазона воспользуемся выражениями для помехи обратного рассеяния и ослабленного сигнала объекта, полученными в малоугловом приближении решения уравнения переноса излучения в атмосфере [4]. Ввиду сложности полученных выражений аналитически решить поставленную задачу не представляется возможным. С целью упрощения чис-

ленного решения введем следующие ограничения. Поскольку в первом приближении спектральные фильтрующие свойства атмосферы пропорциональны коэффициенту рассеяния и монотонно возрастают с уменьшением длины волны, можно положить длинноволновую границу оптимального спектрального диапазона в интервале ближнего УФ λ_{\max} постоянной и равной 0,4 мкм. Известно, что оптимальная (в смысле максимума функционала (2)) спектральная характеристика светофильтра должна иметь вид единичной прямоугольной функции (в случае аддитивной помехи)

$$\tau_{\phi}(\lambda) = \text{rect}\left(\frac{\lambda}{\Delta\lambda}\right), \Delta\lambda = \lambda_{\max} - \lambda_{\min}, \quad (3)$$

что позволяет при поиске экстремума ограничиться вариациями лишь коротковолновой границы λ_{\min} .

Используя оптические параметры атмосферы в УФ-диапазоне из модели Грина [5], рассмотрим величину входного ОСШ в зависимости от изменения границы зоны спектральной чувствительности системы. Зависимости, рассчитанные для заатмосферной высоты наблюдения при высоте Солнца 50° для случая наблюдения в надир подстилающей поверхности типа «свежевывающий снег» и «растительность» при метеорологической дальности видимости 50 км, представлены на рис. 1.

Приведенные кривые хорошо иллюстрируют наличие максимума входного ОСШ в УФ, соответствующего оптимальной границе $\lambda_{\min}^{\text{опт}}$. Интересно отметить тенденцию уменьшения ОСШ при дальнейшем расширении спектрального диапазона (что вообще говоря нехарактерно для наблюдения в видимом диапазоне) и слабую зависимость $\lambda_{\min}^{\text{опт}}$ от коэффициента отражения объекта. Так, для слабоотражающих поверхностей (растительность) наблюдается относительно незначительное уменьшение оптимального спектрального диапазона (на 7 нм) по сравнению со снежной поверхностью, хотя абсолютное значение ОСШ изменяется почти в семь раз. Изменение начальных условий, т. е. уменьшение длинноволновой границы, например, до λ_{\max} , равной 0,38 мкм, приводит к смещению оптимальной коротковолновой границы на 6 нм. Сужение оптимального спектрального диапазона при уменьшении λ_{\max} обусловлено резким увеличением доли рассеянного излучения во входном оптическом сигнале. Влияние изменения доли рассеянного излучения за счет роста оптической толщи из-за роста мутности атмосферы, изменения угла визирования или высоты полета иллюстрируется рис. 2, где представлена высотно-угловая зависимость ширины оптимального спектрального диапазона в ближнем УФ. Влияние атмосферы начинает заметно сказываться с высот, больших 3 км, и становится практически неизменным с высот, больших 30 км. При углах визирования, меньших 15° , угловой зависимостью оптимального спектрального диапазона можно пренебречь.

Анализ приведенных зависимостей позволяет сделать некоторые заключения об оптимизации условий наблюдения в УФ-диапазоне (что также относится и к сине-фиолетовой области спектра при соответствующих атмосферно-ландшафтных ситуациях).

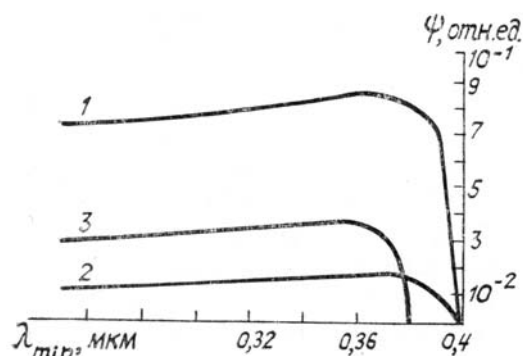


Рис. 1. Зависимость отношения сигнал-шум от коротковолновой границы зоны чувствительности: 1 — $\lambda_{\max} = 0,4$ мкм, подстилающая поверхность — снег; 2 — $\lambda_{\max} = 0,4$ мкм, подстилающая поверхность — растительность; 3 — $\lambda_{\max} = 0,38$ мкм, подстилающая поверхность — снег

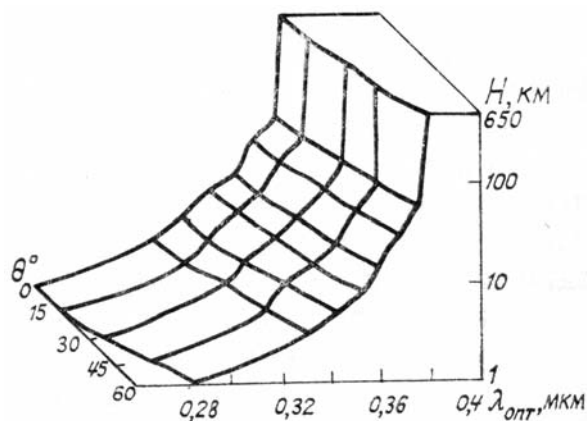


Рис. 2. Высотно-угловая зависимость оптимальной коротковолновой границы для метеорологической дальности видимости 50 км и снежной подстилающей поверхности

Учет влияния атмосферы на данные дистанционного зондирования из космоса показывает, что повышение фотометрической точности (обратно пропорциональной ОСШ) измерений в коротковолновых каналах многозональных систем может идти по пути лишь увеличения чувствительности аппаратуры (увеличение относительного отверстия объектива, чувствительности фотоэлектрического преобразователя), а не за счет расширения зоны спектральной чувствительности системы, которая составляет для хороших условий наблюдения приблизительно 35 нм.

Изменение коэффициентов отражения природных образований слабо влияет на ширину оптимального спектрального диапазона. Изменение же оптических характеристик атмосферы по трассе наблюдения может значительно сказываться на ширине оптимального спектрального диапазона.

При переменных высотах наблюдения целесообразно располагать возможностью адаптации спектральной зоны чувствительности аппаратуры для получения выигрыша в спектральном разрешении и контрасте формируемых системой изображений. Такую адаптацию можно осуществить, например, используя перестраиваемый акустооптический фильтр во входном звене спектральной аппаратуры [6], позволяющий формировать спектральную зону чувствительности с точностью до десятых долей нанометра в реальном масштабе времени.

1. Селиванов В. А. // Исследование Земли из космоса. 1988. № 1. С. 111–120.
2. Смокий О. И. Моделирование полей излучения в задачах космической спектрометрии. Л.: Наука, 1986. 352 с.
3. Гудмен Дж. Статистическая оптика. М.: Мир, 1988. 528 с.
4. Будаков В. П., Пестров Е. Н., Селиванов В. А. // Техника средств связи. Сер. Техника телевидения. 1987. Вып. 3. С. 73–79.
5. Riewe F. R., Green A. E. S. // Appl. Optics. 1978. V. 17. № 12. P. 1923–1929.
6. А. с. 1408543 СССР, НО4N7/18. Устройство формирования спектральной телевизионного сигнала / Селиванов В. А., Пестров Е. Н., Катаев С. И., Буймистряк Г. Я. Оpubл. в БИ. 1988. № 25.

Московский институт связи
Московский энергетический институт

Поступила в редакцию
14 декабря 1988 г.

V. A. Selivanov, V. P. Budakov. Optimization of Spectral Sensitivity of Remote Sensing System When Observing Objects in the Near UV-range.

It is shown, that the optimal spectral sensitivity zone of the earth-surface remote sensing system in the UV-range in terms of maximum image SNR criterion is determined in general by the back-scattering noise value and by its spectral distribution, and is about 35 nm under normal observation conditions.