Модель расчета энергетической доступности объектов наблюдения в видимом диапазоне с использованием геопространственной информации

Model for calculating the energy availability of surveillance objects within the visible range using geospatial information

Привалов / Privalov A.
Андрей Андреевич
(aprivalov@inbox.ru)
доктор военных наук, профессор.
ФГКВОУ ВО «Военная академия связи имени Маршала Советского Союза С. М. Будённого» МО РФ (ВАС им. С. М. Буденного),
профессор кафедры применения войск связи.
г. Санкт-Петербург

Колесов / Kolesov V.
Вадим Александрович
(20121@mail.ru)
кандидат военных наук, доцент.
ВАС им. С. М. Буденного,
преподаватель кафедры организации информационно-аналитической работы.
г. Санкт-Петербург

Ключевые слова: геопространственные данные – geospatial data; системы наблюдения – surveillance systems; видимый диапазон – visible band; индикатриса – indicatrix; яркостный контраст – luminance contrast.

Рассматривается возможность использования геопространственных данных в системах наблюдения видимого диапазона. Проведен анализ влияния различных факторов на распространение признаков деятельности наблюдаемых объектов в видимом диапазоне и на основании этого разработана модель распространения признаков видимого диапазона. Исходным параметром для модели является индикатриса – векторная диаграмма, изображающая зависимость величины интенсивности его носителя от направления (азимута) на него, угла места, расстояния и других факторов.

Abstract: The article considers the possibility of using geospatial data in the visible band surveillance systems. Based on the analysis of how various factors impact the propagation of activity signatures of the objects observed in the visible band, the authors have developed a model of the visible band signatures propagation. The model's initial parameter is the indicatrix – a vector diagram depicting the dependence of its carrier intensity value on the direction (azimuth) towards it, elevation, distance and other factors.

Процесс распространения признаков деятельности объекта наблюдения происходит в среде распространения. В схеме распространения признаков деятельности объекта наблюдения можно выделить следующие основные элементы: физический источник излучения или отражение энергии любой физической природы, среда распространения признаков объекта наблюдения (объекта), приемник полученных признаков. На дальность видимости объектов влияют следующие факторы [3, 6, 9]:

1. Свойства наблюдаемых объектов: размеры, форма, яркость, цвет, состояние поверхности (сухая, мокрая, шероховатая, и пр.).
2. Свойства фона, на который проецируются предметы: яркость, цвет.
3. Прозрачность воздуха (может быть уменьшена дымкой, туманом, мглой, выпадающими осадками).
4. Условия наблюдения объектов: время суток (освещенность), облачность (однородная, неоднородная).
5. Свойства аппарата (приемника), с помощью которого ведется наблюдение (глаза человека, фотоэлемент, фотопленка и пр.).

Различают горизонтальную дальность видимости, когда наблюдение ведется за объектом, находящимся на земной поверхности, и наклонную дальность видимости, когда дальность видимости определяется с самолета и наоборот.

Распределение видимого излучения по областям спектра приведено в таблице 1.

При распространении в атмосфере оптическая волна испытывает превращения, связанные с молекулярным поглощением и рассеянием атмосферными газами, аэрозольным, комбинационным и резонансным рассеянием, нелинейным взаимодействием излучения со средой [3, 8, 9]. Яркости фона $B^*_{ф}$ и объектов наблюдения $B^*_{он}$ определяются по методикам, учитывающим положение Солнца и объекта наблюдения, энергетическое ослабление световых волн в атмосфере, убывают с расстоянием, как $\exp\left(-K_{п.св.\lambda} \cdot r_{сн\text{-}он}\right)$, где: $K_{п.св.\lambda}$ – коэффициент поглощения света; $r_{сн\text{-}он}$ – расстояние между средством наблюдения и объектом наблюдения.

Первоначально определяется освещенность района возможного нахождения объекта наблюдения, исходя из его географических координат $\left(\varphi_{он}, \lambda_{он}\right)$, меридиана Солнца в момент наблюдения $\lambda_{Сол}$ и высоты стояния

4 2020.indd 100 24.12.2020 16:49:20

Таблица 1

Распределение видимого излучения по областям спектра

Области спектра видимого излучения	Длина волны в свободном пространстве, нм
Красное	750…620
Оранжевое	620…590
Желтое	590…560
Зеленое	560...500
Голубое	500…480
Синее	480... 450
Фиолетовое	450... 400

Солнца $h_{Сол}$. Затем, исходя из возможной степени освещенности сторон объекта, определяется реальная (пороговая) дальность: видимости объекта [9] (рис. 1).

При определении высоты Солнца состояния орбиты, типов наблюдаемого объекта и его фона реальная дальность видимости объекта наблюдения определяется по формуле [3]:

$$r_{реал}^{опт} = \frac{1}{K_{п.св.\lambda}} \cdot \ln\left(\frac{K_0 / \varepsilon_{пор} + B_{max} / B_ф - 1}{B_{max} / B_ф} \right), \quad (1)$$

где: K_0 – видимый контраст фона и объекта, не искаженного дымкой, равный отношению величины разностей яркостей фона и объекта к большей из них: $K_0 = \Delta B / B_{max}$, $\varepsilon_{пор}$ – значения порогов опознавания, обнаружения и исчезновение объекта из поля зрения в зависимости от его угловых размеров.

При угловых размерах объекта, равных $20'$: $\varepsilon_{исч} = 0{,}02(2\%)$, $\varepsilon_{обн} = 0{,}05(5\%)$, $\varepsilon_{опозн} = 0{,}07(7\%)$.

Спектральные коэффициенты яркости отраженного излучения для некоторых типов поверхностей приведены в таблице 2.

Оптические волны распространяются только на дальность прямой видимости. После расчета реальной (пороговой) дальности видимости объекта $r_{реал}^{опт}$, исходя из его освещенности по сторонам горизонта, она сравнивается с расстояниями до препятствий, и их высотой. Если высота препятствий позволяет видеть объект, то оно не влияет на достоверность наблюдения. На основании этого делается вывод о влиянии или отсутствии влияния препятствия на дальность, видимости объекта и реальной обстановке. При отражении света от почвенно-грунтового покрова, растительного покрова, от воды, как фоновой поверхности, коэффициент поглощения света рассматривается в виде коэффициентов яркости, полученных эмпирическим путем.

Таким образом, с учетом анализа влияния на распространение оптических волн физико-географических условий, растительного покрова, почвенно-грунтового покрова, элементов гидрографии введем индикатор доступности объекта наблюдения в оптическом диапазоне.

Вектор $D_{он}^{опт}$ определяет данные по доступности объекта наблюдения, – индикатор:

$$D_{он}^{опт} = \begin{cases} 1, \text{ объект доступен } \left(r_{реал}^{опт} \geq r_{сн\text{-}он} \right), \\ 0, \text{ объект недоступен} \end{cases} \quad (2)$$

где: $r_{реал}^{опт}$ – реальная дальность видимости объекта;

$r_{сн\text{-}он}$ – расстояние между средством наблюдения и объектом наблюдения.

Модель распространения признаков оптического диапазона

Для реализации модели распространения признаков оптического диапазона необходимо иметь представление о пространственном распределении признаков объектов наблюдения. Это распределение может быть получено путем построения индикатрис. При этом под индикатрисой (франц. indicatrice, букв. – указывающая) признака объекта наблюдения понимается векторная диаграмма, изображающая зависимость величины интенсивности его носителя от направления (азимута) на него (φ), угла места (β), расстояния (R), и других факторов [6, 8]. Носители признаков деятельности могут отражаться от объекта (например, солнечный свет) или излучаться самим объектом (например, в ИК или радиодиапазоне). В каждом из этих случаев используют различное определение индикатрис.

Под индикатрисой отражения понимается функция, выражающая пространственное распределение интенсивности отраженной мощности, представленное в виде векторной диаграммы, на которой длина радиус-вектора в каком-либо направлении пропорциональна интенсивности отраженной мощности в этом направлении, а концы векторов соединены кривой линией либо

4 2020.indd 101 24.12.2020 16:49:21

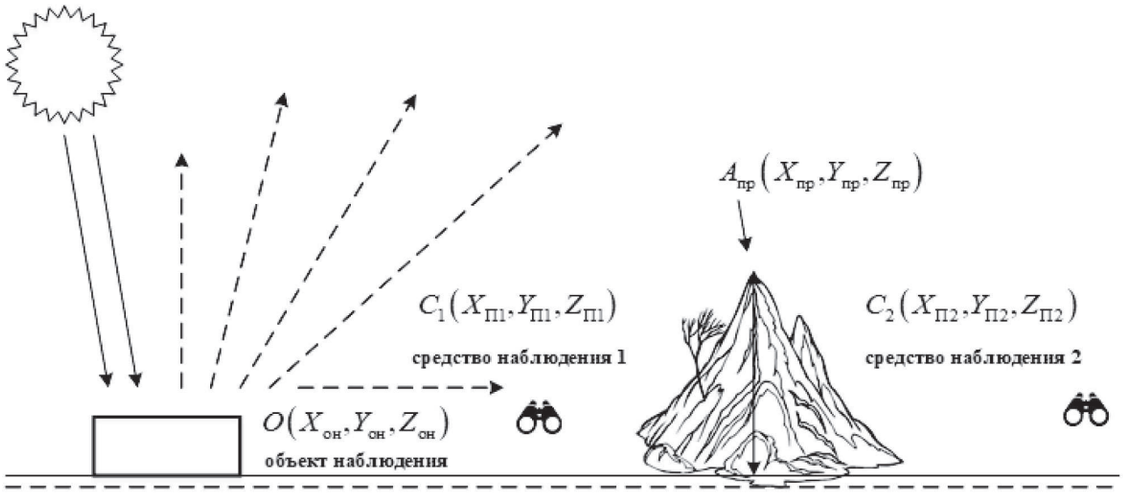

Рис. 1. Влияние рельефа местности, освещенности объекта и местности на распространение световых волн

Таблица 2

Спектральные коэффициенты яркости отраженного излучения для некоторых типов поверхностей

Тип поверхности	Коэффициент яркости отраженного излучения	Тип поверхности	Коэффициент яркости отраженного излучения
Луг зеленый сочный	0,07	Дорога на суглинке сухая	0,21
Луг желтый выжженный	0,14	Крыша красная железная	0,13
Лес хвойный (кроны)	0,04	Крыша драночная старая	0,15
Лес лиственный летом	0,05	Бетон сухой	0,32
Лес лиственный осенью	0,15	Брезент сухой	0,37
Песок желтый сухой	0,15	Металлическая поверхность темно-зеленая	0,08
Почва супесчаная сухая	0,13	Дорога на песке сухая	0,20
Шоссе сухое	0,32		

4 2020.indd 102 24.12.2020 16:49:21

поверхностью. В оптическом диапазоне в зависимости от вида индикатрисы отражения различают диффузное, зеркальное и смешанное отражение. Подавляющее большинство объектов имеет смешанную индикатрису отражения и их с допустимой ошибкой принимают диффузно отражающими. При диффузном отражении коэффициент яркости равен коэффициенту отражения. При необходимости обнаружения важно учитывать не только яркость объекта в целом, но и его геометрические размеры и форму. Сложный объект можно рассматривать как совокупность простых объектов. При наблюдении сложного объекта важным параметром является интервал яркостей, т.е. соотношение максимальной яркости к минимальной. Индикатрису отражения используют при анализе возможности качественного восприятия всех деталей объекта. Сложный объект представляет собой случайное поле яркости, описываемое случайной функцией от прямоугольных координат. Экспериментальные исследования показывают, что, как правило, это нестационарная функция. Ее характеристики зависят от начала отсчета и ряда важных факторов: времени года, суток, метеоусловий и пр. Свойством стационарности при фиксированных условиях наблюдения обладают только протяженные природные образования: лес, степь, болото и пр. [10].

Для реальных объектов точное построение индикатрисы излучения представляет большие трудности в связи с многообразием форм и пространственных ориентаций излучающих предметов, отсутствием достоверных данных о коэффициентах излучения и взаимовлияния поверхностей. Поэтому на практике пользуются упрощенной схемой расчета. Объект заменяют совокупностью излучающих поверхностей, в пределах которых излучение можно считать постоянным, либо выбирают наиболее сильно излучающую поверхность.

Так как индикатриса излучения (отражения) представляет в общем случае объемную поверхность, то обычно находится семейство индикатрис для постоянных азимута или угла места. Если объект является симметричным, можно ограничиваться построением индикатрис в характерных плоскостях. Индикатриса излучения (отражения) образует в пространстве область энергетической доступности признаков деятельности объекта.

Параметры индикатрисы в конкретном случае будут определять различные факторы: наличие или

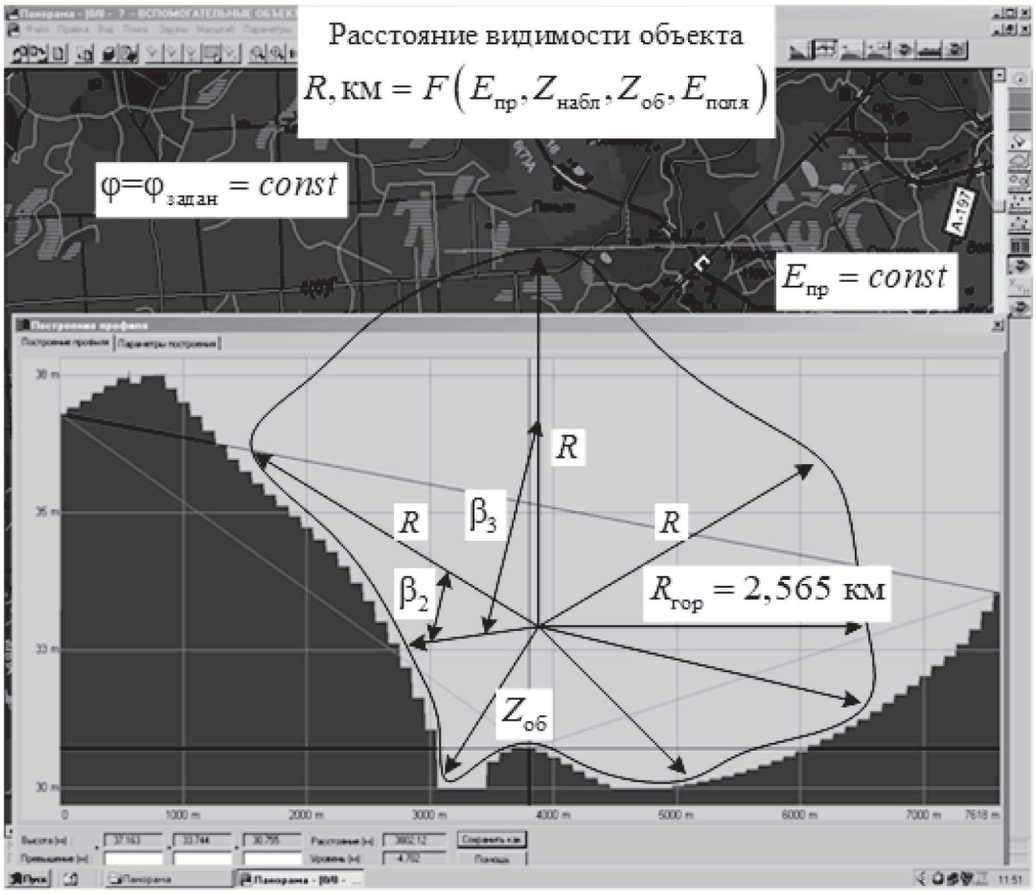

Рис. 2. Индикатриса энергетической доступности типового грузового автомобиля в вертикальной плоскости (вариант)

4 2020.indd 103 24.12.2020 16:49:22

отсутствие каких-либо предварительных (априорных) сведений об объекте наблюдения, физико-географические условия района ведения наблюдения (характер рельефа, растительности, гидрография и пр.), гидрометеорологические условия, размеры района наблюдения, и др. [1, 2, 7]. В качестве примера рассмотрим реальный объект наблюдения – типовой грузовой автомобиль.

Индикатриса обладает следующими свойствами [8]:

1. Длина вектора в конкретной точке пространства определяется чувствительностью (разрешающей способностью) средства наблюдения и наличием среды распространения с различной степенью поглощения излучения. Мощность излучения, как правило, изменяется обратно пропорционально квадрату расстояния либо экспоненте.

2. Длина вектора зависит от характеристик физико-географических условий (гидрометеоусловия, рельеф, растительный и почвенно-грунтовый покров, гидрография), так как признакам различных диапазонов излучения свойственно различное ослабление при распространении вдоль поверхности Земли, в растительном покрове, проникновению вглубь препятствий.

Вариант индикатрисы энергетической доступности типового грузового автомобиля в вертикальной плоскости представлен на рис. 2.

При моделировании возможного нахождения объекта наблюдения на электронной карте возникает необходимость рассчитать зону распространения признака на реальной местности. Для этого необходимо [5, 6]:

1. Исходя из возможного расстояния распространения признака выбрать размеры элементарной площадки;

2. Осуществить привязку к электронной карте с использованием прямоугольной системы координат, за оси координат в которой приняты изображение осевого меридиана координатной зоны – ось абсцисс и изображение экватора – ось ординат.

Положение элементарной площадки K_{gl} указывается ее расстоянием от осей координат – абсциссой и ординатой $\left(X_g, Y_l\right)$. При работе с электронными картами привязка координат производится электронным счетчиком в заранее выбранной системе координат. Координатная сетка, соответствующая целому числу километров на местности, играет в этом случае вспомогательную роль. Она может использоваться для отыскания на карте различных объектов при постановке задач, составлении отчетных документов, быстрой оценки расстояний, определения направлений.

Построение индикатрисы энергетической доступности признаков наблюдения в видимом диапазоне

При построении индикатрисы энергетической доступности в видимом диапазоне для проведения расчетов необходимо иметь следующие данные, получаемые из геоинформационной системы [4, 5, 6]:

– углы направления распространения светового излучения в горизонтальной α,φ и вертикальной β плоскостях по отношению к координатным осям X, Y, Z;

– яркостный контраст объект-фон;

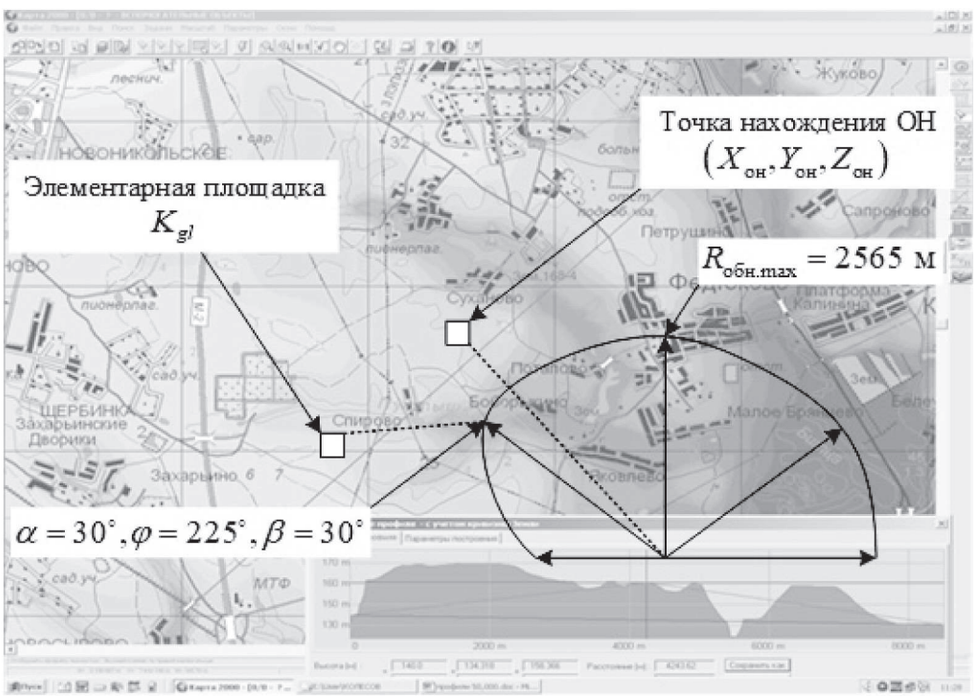

Рис. 3. Индикатриса энергетической доступности типового грузового автомобиля в вертикальной плоскости в видимом диапазоне по азимутам $\varphi = 45^\circ - 225^\circ$

4 2020.indd 104 24.12.2020 16:49:22

Рис. 4. Индикатриса энергетической доступности типового грузового автомобиля в видимом диапазоне

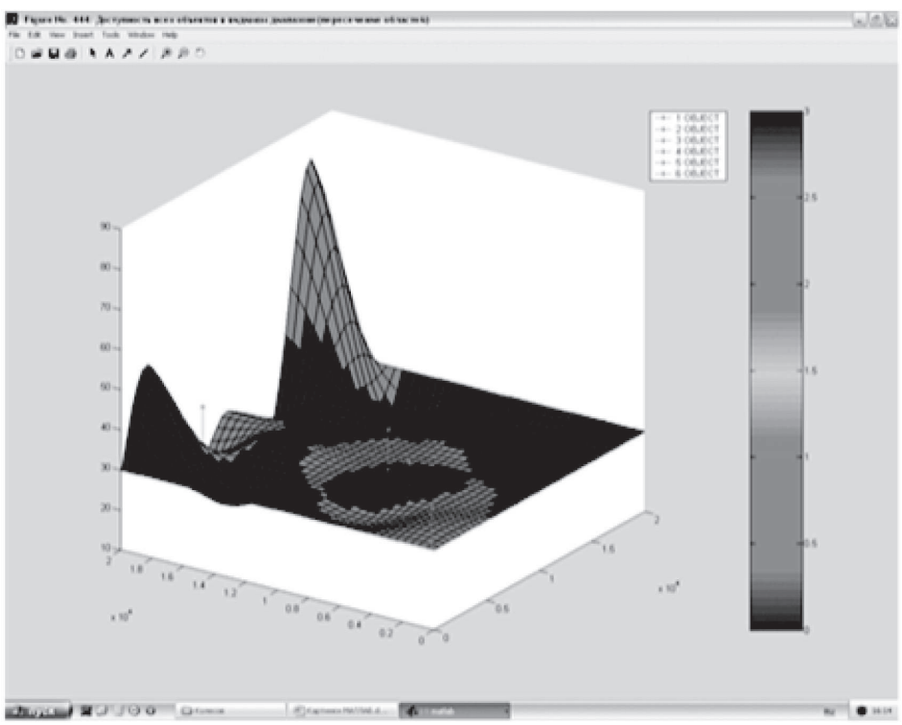

Рис. 5. Индикатрисы энергетической доступности группы типовых грузовых автомобилей в видимом диапазоне в условиях пустынной местности

4 2020.indd 105 24.12.2020 16:49:22

– характеристики оптических систем.

С использованием этих параметры (формула (1)) вычисляются координаты энергетически доступной элементарной площадки K_{gl}.

Длина вектора в видимом диапазоне определяется:

– характеристикой трассы распространения световых волн (необходима только открытая трасса);

– мощностью, диаграммой направленности и спектром светового излучения;

– параметрами среды распространения (время года, влажность воздуха, осадки);

– пороговой чувствительностью приемника светового излучения.

В качестве модели рассмотрим размещение автомобиля в условиях равнинной местности. Исходными данными для моделирования являются: время года – лето, метеорологическая дальность видимости $S_{\text{М}} = 20$ км (удовлетворительная видимость), высота над уровнем моря $Z_{\text{рель}} = 162$ м. Расчет произведен согласно разработанного алгоритма и справочных таблиц [3, 6].

Результаты расчетов представлены в виде индикатрис энергетической доступности в вертикальной и горизонтальной плоскостях (рис. 3, 4). Для построения данной индикатрисы энергетической доступности предварительно были построены индикатрисы энергетической доступности объекта в вертикальной плоскости по азимутам $\varphi = 0^\circ - 180^\circ; 45^\circ - 225^\circ; 90^\circ - 270^\circ; 135^\circ - 315^\circ$.

Индикатрисы энергетической доступности группы типовых грузовых автомобилей в видимом диапазоне в условиях пустынной местности, выполненные в пакете программ «MATLAB», показаны на рис. 5.

Таким образом, при учете влияния рельефа местности на распространение оптических волн необходимо иметь следующие основные и дополнительные геопространственные данные:

– освещенность района возможного нахождения объекта наблюдения, исходя из его географических координат $(\varphi_{\text{он}}, \lambda_{\text{он}})$, меридиана Солнца в момент наблюдения $\lambda_{\text{Сол}}$ и высоты стояния солнца;

– K_0 – яркостный контраст разностей яркостей фона и объекта;

– $\varepsilon_{\text{пор}}$ – значения порогов опознавания, обнаружения и исчезновения объекта из поля зрения;

– N – число рассеивающих частиц в единице объёма воздуха;

– n – показатель преломления воздуха;

– ν – масса одной рассеивающей частицы;

– λ – длина волны светового излучения;

– δ – фактор деполяризации рассеянного излучения, равный $\delta = 0{,}035$;

– $k(\nu)$ – коэффициент поглощения светового излучения в воздухе за счет аэрозольного рассеяния (осадки, дымка, дым и пр.);

При этом для учета влияния рельефа местности на распространение световых волн необходимо иметь из слоя ГИС «рельеф» следующие данные:

– координаты объекта наблюдения $O(X_{\text{он}}, Y_{\text{он}}, Z_{\text{он}})$, средства наблюдения $C(X_{\text{сн}}, Y_{\text{сн}}, Z_{\text{сн}})$, препятствия $B_{\text{пр}}(X_{\text{пр}}, Y_{\text{пр}}, Z_{\text{пр}})$.

Используя эти данные, вычисляются:

– коэффициент поглощения света $K_{\text{п св}\,\lambda}$;

– реальная (пороговая) дальность видимости объект наблюдения $r_{\text{реал}}^{\text{опт}}$.

Использование разработанной модели распространения признаков деятельности объектов наблюдения и дополнительных геопространственных данных позволит реально оценивать доступность объектов наблюдения в видимом диапазоне. В зависимости от геометрических размеров объектов наблюдения позволит рассчитать их дальности обнаружения, распознавания и исчезновения. Полученные результаты моделирования могут быть использованы специалистами, занимающимися разработкой и эксплуатацией систем наблюдения видимого диапазона.

Литература

1. Алексеев, С. А. Телевизионные системы наблюдения / С.А. Алексеев, В.В. Волхонский, А.В. Суханов. – СПб.: Университет ИТМО, 2015. – 126 с.

2. Бакланов, А. И. Системы наблюдения и мониторинга / А.И. Бакланов. – М.: БИНОМ, 2009. – 234 с.

3. Зуев, В. Е. Оптические модели атмосферы / В.Е. Зуев, Г.М. Креков. – М.: Гидрометеоиздат, 1986. – 256 с.

4. Карманов, А. Г. Геоинформационные системы территориального управления / А.Г. Карманов, А.И. Кнышев, В.В. Елисеева. – СПб.: СПбГУ ИТМО, 2015. – 121 с.

5. Колесов, В. А. Подход к совершенствованию системы управления средствами мониторинга / В.А. Колесов, А.В. Панков // Информация и Космос. – 2008. – №.3. – С. 80–82.

6. Трубецкой, А. И. Вопросы совершенствования применения поисковых систем на основе использования ГИС технологий / А.И. Трубецкой, В.А. Колесов // Информация и Космос. – 2004. – № 2. – С. 34–36.

7. Лебедев, А. А. Космические системы наблюдения / А.А. Лебедев, О.П. Нестеренко. – М.: Машиностроение, 1991. – 224 с.

8. Смирнов, С. А. Преобразование оптических сигналов / С.А. Смирнов. – СПб.: СПбГУ ИТМО, 2008. – 113 с.

9. Хромов, С. П. Метеорологический словарь / С.П. Хромов, Л.И. Мамонтова. – Л.: Гидрометеоиздат, 1974. – 568 с.

10. Цветков, В. Я. Геоинформационные системы и технологии / В.Я. Цветков. – М.: Финансы и статистика, 1998. – 288 с.

4 2020.indd 106 24.12.2020 16:49:23