

*Четырнадцатая Международная научно-техническая конференция
«Оптические методы исследования потоков»
Москва, 26 – 30 июня 2017 г.*

УДК 621.37/.39

А.А. Бабаев

Филиал Акционерного Общества «Научно-производственная корпорация «Системы прецизионного приборостроения» в Великом Новгороде, Россия, 173003, Великий Новгород, наб. реки Гзень д. 9, E-mail: babaev_aa@nrkspp.ru

ОПРЕДЕЛЕНИЕ РАЗРЫВОВ ОБЛАЧНОСТИ В ДНЕВНЫХ УСЛОВИЯХ ДЛЯ ПОВЫШЕНИЯ ПРОИЗВОДИТЕЛЬНОСТИ СТАНЦИЙ СПУТНИКОВОЙ ЛАЗЕРНОЙ ДАЛЬНОМЕТРИИ

АННОТАЦИЯ

Доклад содержит описание разработанного алгоритма разрывов облачности в дневных условиях для повышения производительности станций спутниковой лазерной дальнометрии. Предложенный алгоритм является адаптивным и содержит настройки для регулирования быстродействия. Прикладные возможности алгоритма апробированы на экспериментальных данных, полученных с лазерных станций спутниковой лазерной дальнометрии.

РАЗРЫВЫ ОБЛАЧНОСТИ, СТАНЦИИ СПУТНИКОВОЙ ЛАЗЕРНОЙ ДАЛЬНОМЕТРИИ, КОЛОМЕТРИЧЕСКАЯ СИСТЕМА МАК-АДАМА, МЕТОД ОЦУ.

ВВЕДЕНИЕ

В последние годы вводятся в эксплуатацию станции спутниковой лазерной дальнометрии нового поколения, работа которых основана на единой шкале времени и одновременном определении с помощью лазера и радиочастотных измерений дальности и псевдодальности. Эти станции должны обеспечивать субмиллиметровую дальномерных и субнаносекундную точности псевдодальномерных измерений, включая дневные условия работы. Полученные измерительные данные используются в дальнейшем для решения следующих задач:

- сличения бортовых и наземных шкал времени;
- синхронизации удаленных эталонов частоты и времени;
- повышения точности геодезического и эфемеридно-временного обеспечения глобальных навигационных спутниковых систем и т.д.

Важнейшим требованием, предъявляемым к станциям нового поколения, является повышение их производительности, которая не всегда удовлетворяет современным требованиям. Под производительностью понимается количество космических аппаратов группировки ГЛОНАСС, по которым успевают отработать в единицу времени лазерная станция.

Одним из перспективных путей дальнейшего повышения производительности лазерных станций является надежное определение пригодных для её работы зон в дневных условиях.

Существует ряд работ, в которых приведены примеры определения пригодных зон для работы лазерных станций, но до конца вопрос определения таких зон и эффективного

использования станций остается мало изученным, а, следовательно, является актуальным, имеет научную и практическую значимость.

Актуальность и важность выбранной темы подтверждается также развитием наземного сегмента космического комплекса системы ГЛОНАСС [1 - 4].

На сегодня известно несколько наиболее применяемых методов определения пригодных зон для работы лазерных станций, связанных с определением наличия или отсутствия просветов на небосводе и обеспечивающих проведение с Земли в круглосуточном режиме измерений характеристик космических объектов. В основном эти методы базируются на использовании:

- различий спектр-энергетических характеристик облачного и безоблачного неба;
- регистрации тепловых контрастов между облачным и безоблачным небом;
- оценки пропускания участков неба по характеристикам каталожных звезд.

Каждый из перечисленных выше методов обладает большими возможностями, имеет свои достоинства и недостатки.

Как следует из работы [5] наиболее оптимальным с точки зрения сложности определения порогового значения для бинаризации кадра, стоимости изготовления и эксплуатации, является использование метода, основанного на различии спектр-энергетических характеристик облачного и безоблачного неба.

Целью данной работы является разработка быстродействующего адаптивного алгоритма определения разрывов облачности в дневных условиях для повышения производительности станций спутниковой лазерной дальнометрии, основанном на использовании оценки пропускания участков неба по различным спектр-энергетическим характеристикам облачного и безоблачного неба.

Методы исследования, используемые для достижения поставленной цели:

- методы оценки пропускания участков облачного и безоблачного неба по различным спектр-энергетическим характеристикам.
- компьютерное моделирование с использованием законов Грассмана и обработка видеоданных, выбор оптимальных алгоритмов определения пригодных зон в облачном поле по цветному изображению неба и его облачного поля;
- методы цифровой обработки видеоданных, методы оценки, компьютерное математическое моделирование, экспериментальная обработка полученных данных и подтверждение предлагаемого алгоритма проводились на персональном компьютере последнего поколения с использованием оригинальных программ разработанных как автором, так и созданных ранее в Филиале АО «НПК «СПП» в Великом Новгороде.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ ДОКЛАДА

Наиболее известными и часто используемыми алгоритмами определения разрывов облачности являются следующие алгоритмы [5, 6]: Red-Blue Ratio (RBR), Whiteness Detector (WD), Red-Blue Difference (RBD), способ «Синева или несинева неба».

1) Red-Blue Ratio (RBR).

В методе Red-Blue Ratio используются яркостные составляющие красного I_R и синего I_B каналов. Для определения принадлежности пикселя используется соотношение:

$$S = \begin{cases} 1, \frac{I_R}{I_B} \geq C_{RBR} \\ 0, \frac{I_R}{I_B} < C_{RBR} \end{cases}, \quad (1)$$

где C_{RBR} – настраиваемый параметр.

Если соотношение красного к синему меньше порога, то пиксель считается принадлежащим облачному просвету (ясному небу) и $S = 0$. Если же соотношение красного к синему больше или равно порога, то пиксель считается принадлежащим облаку и $S = 1$.

Ясное небо обычно синее и соотношение красного и синего меньше порога C_{RBr} . Облака обычно белые, серые или красноватые и соотношение красного и синего больше порога C_{RBr} .

2) Whiteness Detector (WD).

Метод WD классифицирует пиксель как облако, если он белый (серый), в противном случае как облачный просвет (ясное небо). Для определения принадлежности пикселя используется соотношение:

$$S = \begin{cases} 1, (I_B - I_R < C_{WD} \cdot I_B \wedge (I_B - I_G < C_{WD} \cdot I_B)) \\ 0, \text{во_всех_остальных_случаях} \end{cases}, \quad (2)$$

где C_{WD} – настраиваемый параметр.

3) Red-Blue Difference (RBD).

Метод Red-Blue Difference использует яркостные составляющие красного I_R и синего I_B каналов. Для определения принадлежности пикселя используется соотношение:

$$S = \begin{cases} 1, I_R - I_B \geq C_{RBr} \\ 0, I_R - I_B < C_{RBr} \end{cases}, \quad (3)$$

где C_{RBr} – настраиваемый параметр.

Если разность красного и синего меньше порога, то пиксель считается принадлежащим облачному просвету (ясному небу) и $S = 0$. Если же разность красного и синего больше или равна порога, то пиксель считается принадлежащим облаку и $S = 1$.

Чистое небо обычно синее, что приводит к отрицательным значениям разности $I_R - I_B$, тогда как облака обычно имеют белый, серый или красноватый цвет, что приводит к почти нулевым или положительным значениям разности.

4) Способ «Синева или несинева неба»

Способ присваивает значение «синевы неба» ($S = 0$) тем точкам, у которых значение синей компоненты больше, чем для красной и зеленой компонент. «Несинева неба» ($S = 1$) соответствует случаю, когда значение синей компоненты не больше значения для красной или зеленой компонент [5].

$$S = \begin{cases} 0, (I_B > I_R) \wedge (I_B > I_G) \\ 1, (I_B \leq I_R) \wedge (I_B \leq I_G) \end{cases}. \quad (4)$$

Рассмотренные выше алгоритмы не являются адаптивными, следовательно, невозможно подобрать универсальные коэффициенты в качестве их настроек, при которых возможно было бы всегда достоверно определять разрывы облачности при любой фоноцелевой обстановке.

Автором разработан адаптивный алгоритм (adaptive UV) определения пригодных атмосферных зон для работы лазерных станций нового поколения, основанный на использовании оценки пропускания участков неба по различным спектр-энергетическим характеристикам облачного и безоблачного неба.

Применительно к лазерным станциям автором предложено использование разработанного адаптивного алгоритма при решении задачи предварительной грубой оценки

пригодных зон для работы станций с использованием фотометра, а для уточнения интегрального коэффициента пропускания обнаруженной рабочей зоны предложено использовать телевизионный канал наведения из состава станций. Данный подход позволил реализовать объективное получение информации о возможных пригодных зонах работы лазерных станций.

Предложенный адаптивный алгоритм основан на различии цвета соответствующих участков неба и состоит из следующие этапов:

1) Преобразование цветовой информации осуществляется по следующей схеме:

$$RGB \rightarrow X, Y, Z \rightarrow x', y', z' \rightarrow x, y \rightarrow u, v \text{ (Мак-Адама)}. \quad (5)$$

Выберем единицы измерения координат цвета r', g', b' таким образом, чтобы для опорного белого цвета типа E они были бы одинаковы. При использовании основных цветов RGB модели некоторая их часть в области насыщенных голубых тонов не может быть воспроизведена, так как теоретически некоторые цвета представляются отрицательными значениями удельных координат данной колориметрической системы. Измеряемый цвет C' может быть записан как:

$$C' = r' R + g' G + b' B, \quad (6)$$

а его яркость:

$$L = r' + 4,5907 g' + 0,0601 b'. \quad (7)$$

Помимо наличия отрицательных удельных координат при определении яркости необходимо взвешенное суммирование трех координат цвета. В этой связи, целесообразно на первом этапе перейти к колориметрической системе X, Y, Z по зависимостям [7]:

$$x' = 0,4887 r' + 0,3107 g' + 0,2006 b', \quad (8)$$

$$y' = 0,1762 r' + 0,8130 g' + 0,0108 b', \quad (9)$$

$$z' = 0,0000 r' + 0,0102 g' + 0,9898 b'. \quad (10)$$

Для оценки цвета участков облачного и безоблачного неба целесообразно пользоваться не плоскостью единичных цветов X, Y, Z , а ее проекцией на плоскость xOy , называемой диаграммой цветности. Если известны модули x', y', z' вектора в цветовом пространстве, то координаты цветности определяются уравнением [7]:

$$x = \frac{x'}{x' + y' + z'}, \quad y = \frac{y'}{x' + y' + z'} \quad (11)$$

Координаты цветности основных цветов R, G, B и стандартных источников белого цвета приведены в таблице 1.

В колориметрических системах X, Y, Z и RGB нелинейная зависимость одинаковых расстояний на графиках цветности связана с визуальной идентификацией цветов. Колориметрическая система Мак-Адама является равноконтрастной системой, в которой одинаковым расстояниям на графике цветностей соответствуют примерно одинаковые визуальные различия.

Формулы перехода из системы x, y в систему u, v (Мак-Адама) имеют вид [7]:

$$u = \frac{4x}{12y - 2x + 3}, \quad v = \frac{6y}{12y - 2x + 3}. \quad (12)$$

Координаты шести оптимальных цветов, из которых три близки к основным цветам приемника цветного телевидения, а три близки к цветам, дополнительным к этим основным цветам приведены в таблице 2.

Таблица 1. Координаты цветности основных цветов R, G, B и стандартных источников белого цвета

Цвет	Координаты цветности	
	x	y
Красный (R)	0,670	0,330
Зеленый (G)	0,210	0,710
Синий (B)	0,140	0,080
(C) - стандартизованный усредненный дневной свет 6774 K°	0,310	0,316
(E) - свет равно энергетического источника 5700 K°	0,333	0,333
(A) - стандартный свет лампы накаливания 2856K°	0,4476	0,4075
(D ₆₅) 6504K°	0,313	0,329
(D ₇₅) 7500K°	0,3003	0,3103

Таблица 2. Соответствие цветов координатам колориметрической системе Мак-Адама

Цвет	u	v
Красный	0,4742	0,3494
Желтый	0,2169	0,3724
Зеленый	0,0843	0,3817
Голубой	0,1131	0,2921
Синий	0,1962	0,0998
Малиновый	0,3461	0,2416
Белый E	0,2104	0,3156
Белый C	0,2009	0,3072

2) Адаптивная часть предлагаемого автором алгоритма заключается в определении участков облачного и безоблачного неба с использованием метода Оцу [8], который выбирает порог бинаризации путем минимизации различных вариантов черных и белых пикселей отдельно для пространств u, v Мак-Адама. Затем находится обобщенное uv пространство с использованием условия:

$$S = \begin{cases} UV_{i,j} = 0, \text{ - Порог } U > U_{i,j} \text{ - Порог } V > V_{i,j} \\ UV_{i,j} = 1, \text{ в остальных случаях} \end{cases}. \quad (9)$$

3) Определяются центры найденных объектов (облаков) одним из известных способов.

Предложенный адаптивный алгоритм определения просветов апробирован по полному полю кадра фотометра размером около 16М пикселей. С учётом использования алгоритма Оцу и использования масок фильтрации предложенный алгоритм требует значительного числа вычислений и времени.

Учитывая требования к размеру определяемой рабочей зоны лазерных станций в

единицы угловых градусов, предлагается перед применением алгоритма Оцу ввести децимацию обрабатываемого изображения в n раз. Так как размер формата кадра является величиной кратной степени 2, то и коэффициент децимации предложено использовать со значениями 2, 4, 8.

Предложенный быстрый алгоритм определения пригодных зон для работы лазерных станций нового поколения позволил повысить производительность получения информации о состоянии облачности и наличии просветов не менее, чем в 4, 16, 64 раз (в зависимости от настроек алгоритма).

На рис. 1 - 4 приведены экспериментальные результаты применения, предлагаемого в главе 2 способа определения пригодных зон для работы лазерных станций на реальных данных, полученных от них при различных коэффициентах децимации, формат изображения 16 Мпикселей.

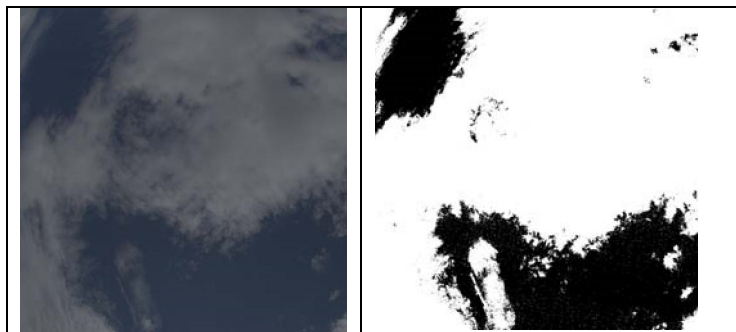


Рис. 1 - Коэффициент децимации 1

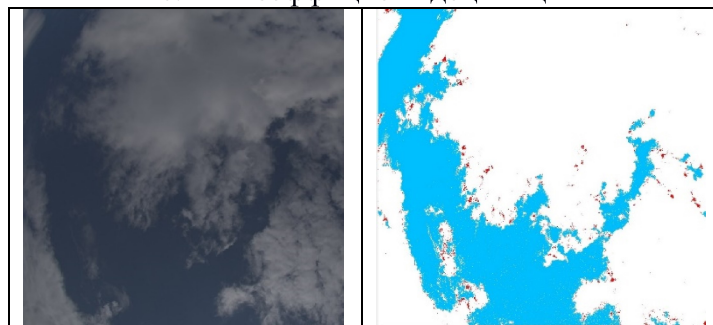


Рис. 2 - Коэффициент децимации 2

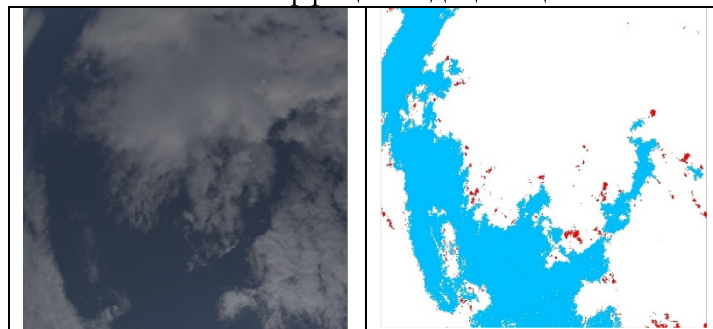


Рис. 3 - Коэффициент децимации 4

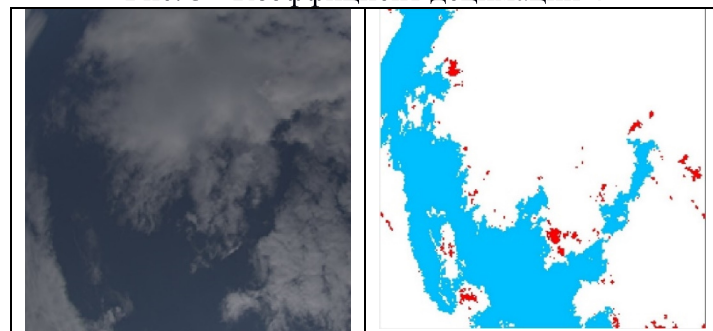


Рис. 4 - Коэффициент децимации 2

Проведённая сравнительная оценка существующих и предложенного алгоритма поиска разрывов облачности с точки зрения точности определения пригодности зон для работы лазерных станций на экспериментальных данных показала следующее. Предложенный в работе алгоритм даёт более точное определение пригодных зон для самых различных фоноцелевых условий. Данный эффект достигнут благодаря адаптивности предложенного алгоритма, заключающейся не только в поиске адаптивного порога по всему кадру, но и определении локальных адаптивных порогов.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В ходе работы автором получены следующие основные научные результаты:

1. Впервые разработан и апробирован в реальных условиях адаптивный алгоритм определения разрывов облачности в дневных условиях;

2. Предложена его модификация, повышающая быстродействие определения пригодных зон для работы лазерных станций нового поколения, позволяющая повысить производительность получения информации о состоянии облачности и наличии просветов не менее, чем в 4, 16, 64 раз (в зависимости от настроек алгоритма).

Таким образом, благодаря проведенным исследованиям и полученным результатам, поставленная в работе цель достигнута. Разработан быстродействующий адаптивный алгоритм определения разрывов облачности в дневных условиях для повышения производительности станций спутниковой лазерной дальнометрии, основанный на использовании оценки пропускания участков неба по различным спектр-энергетическим характеристикам облачного и безоблачного неба. Данный алгоритм повысил производительность и эффективность работы лазерных станций нового поколения.

Применительно к лазерным станциям автором предложено использование разработанного алгоритма при решении задачи предварительной грубой оценки пригодных зон для работы станций с использованием фотометра, а для уточнения зоны работы лазерных станций предложено использовать телевизионный канал наведения из состава станций. Данный подход позволил реализовать получение информации о возможных пригодных зонах работы лазерных станций.

Полученные в данной работе научные и практические могут быть эффективно использованы при создании лазерных станций последующих поколений.

БЛАГОДАРНОСТИ

Автор выражает глубокую благодарность руководству и всем коллегам Филиала АО «НПК «СПП» в Великом Новгороде за поддержку и оказанную помощь.

СПИСОК ОБОЗНАЧЕНИЙ

x – координаты цветности;

y – координаты цветности;

u – координаты в пространстве U Мак-Адама;

v – координаты в пространстве V Мак-Адама.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Шаргородский В. Д., Косенко В. Е., Садовников М. А., Чубыкин А. А., Мокляк В. И. Лазерный Глонасс // Вестник СибГАУ. 2013. №6 (52).
2. М. А. Садовников, М. В. Барышников, В. Д. Шаргородский Лазерная спутниковая дальнометрия: новый этап развития // Электромагнитные волны и электронные системы. - 2014. - Т. 19, № 8. - С. 11-17

3. **Садовников М.А** Российская станция лазерной дальнометрии нового поколения, тезисы доклада на конференции, МЕТРОЛОГИЯ ВРЕМЕНИ И ПРОСТРАНСТВА, Суздаль, 17-19 сентября 2014 г.
4. **М. А. Садовников** Принципы построения спутниковых лазерных дальномеров для работы в дневных условиях // Электромагнитные волны и электронные системы. - 2014. - Т. 19, № 8. - С. 27-33.
5. Патент РФ № 2012130078/28, 16.07.2012. Способ определения балла облачности // Патент России № 2525625. 20.08.2014. Бюл. № 3. / Зуев С.В., Левикин В.А.
6. **Ghonima, M. S., Urquhart, B., Chow, C. W., Shields, J. E., Cazorla, A., and Kleissl, J.:** A method for cloud detection and opacity classification based on ground based sky imagery, Atmos. Meas. Tech., 5, 2881-2892.
7. Колориметрия при видеообработке/ Ж. Годен: пер. с фр. А. Л. Лаут М.: Техносфера, 2008, 324 с.
8. **Otsu, N.,** «A Threshold Selection Method from Gray-Level Histograms,» IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics, Часть 9, №1, 1979, стр. 62-66.

A.A. Babaev

Filial Akcionernogo Obshchestva «Nauchno-proizvodstvennaya korporaciya «Sistemy precizionnogo priborostroeniya» v Velikom Novgorode, Russia, 173003, Velikiy Novgorod, nab. reki Gzen, E-mail: babaev_aa@npkssp.ru

DETERMINATION OF GAP IN THE CLOUDS IN DAY CONDITIONS FOR INCREASING THE PERFORMANCE OF SATELLITE LASER RANGING STATIONS

The report contains a description of the developed algorithm of cloud breaks in daytime conditions for improve the performance of satellite laser ranging (SLR) stations. The proposed algorithm is adaptive and contains settings for speed control. Applied capabilities of the algorithm are tested on experimental data obtained from laser stations of satellite laser ranging.

GAP IN THE CLOUD, SATELLITE LASER RANGING STATIONS, MCADAMS'S COLOMETRIC SYSTEM, OTSU'S METHOD