

**ВЛИЯНИЕ ФОРМЫ ЗОНЫ ОБЗОРА НА ЭФФЕКТИВНОСТЬ ОБЗОРА ЗЕМЛИ
КОСМИЧЕСКИМ АППАРАТОМ РАДИОЛОКАЦИОННОГО НАБЛЮДЕНИЯ**

В. С. Варфоломеев

Конструкторское бюро «Арсенал» имени М. В. Фрунзе
Российская Федерация, 195009, г. Санкт-Петербург, ул. Комсомола, 1-3
E-mail: varfolomeev008@mail.ru

Дистанционное зондирование Земли (ДЗЗ) является одним из приоритетных направлений развития российской космонавтики. В настоящее время значительное развитие получили космические аппараты радиолокационного наблюдения.

Традиционно космические аппараты ДЗЗ радиолокационного наблюдения используют односторонний или двусторонний боковой обзор (электрическая ось антенны отклонена от направления в нади́р) в режиме синтезированной апертуры. Радиолокационные снимки получают при активном методе съёмки.

Эффективность использования космических систем дистанционного зондирования Земли оценивается в том числе разрешающей способностью и периодичностью наблюдения. Повысить периодичность обзора можно путём увеличения количества космических аппаратов в орбитальной группировке, увеличения ширины полосы обзора или путём изменения мгновенной зоны обзора. Для увеличения эффективности использования космических систем ДЗЗ предлагается использовать радиолокационный комплекс с круговым обзором. При использовании кругового обзора с сохранением углов наблюдения, при которых работает радиолокационный комплекс, мгновенная зона обзора принимает форму кольца с центром в подспутниковой точке.

Для сравнения эффективности использования космических аппаратов ДЗЗ радиолокационного наблюдения с различными формами мгновенной зоны обзора были произведены расчёты коэффициента покрытия (доли поверхности Земли, которая осмотрена космическим аппаратом) для различного количества витков, а также приведён сравнительный анализ времени достаточного осмотра заданного широтного пояса. Расчёты проводились с использованием имитационного моделирования полёта космического аппарата, при котором учитываются размеры и формы мгновенной зоны обзора, её расположение относительно трассы полёта космического аппарата, полёт космического аппарата моделируется с учётом возмущающих сил.

Результаты расчётов показывают, что на периодичность, а следовательно, на эффективность обзора земной поверхности существенное влияние оказывает форма мгновенной зоны обзора. В целях повышения эффективности использования космических систем ДЗЗ радиолокационного наблюдения целесообразно рассмотреть возможность создания бортового радиолокационного комплекса кругового обзора.

Ключевые слова: дистанционное зондирование Земли, периодичность наблюдения, боковой обзор, мгновенная зона обзора, эффективность обзора, радиолокация.

Sibirskii Gosudarstvennyi Aerokosmicheskii Universitet
imeni Akademika M. F. Reshetneva. Vestnik
Vol. 18, No. 1, P. 118–122

**INFLUENCE OF THE SHAPE OF THE FOOTPRINT ON THE EFFICIENCY
OF THE EARTH OBSERVATION BY THE SPACECRAFT OF RADAR WORK**

V. S. Varfolomeev

Design Bureau “Arsenal” M. V. Frunze
1-3, Komsomola Str., Saint-Petersburg, 195009, Russian Federation
E-mail: varfolomeev008@mail.ru

Remote sensing is one of the priority directions of development of Russian cosmonautics. Nowadays, significant development of spacecraft radar is essential.

Traditionally, remote sensing spacecraft radar of the Earth observation uses unilateral or bilateral lateral review (electric antenna axis is inclined from the direction of the nadir) in synthetic aperture mode. Radar images are obtained by the method of active shooting.

The effectiveness of the use of space systems for remote sensing of the Earth is estimated, including the resolution and frequency of observation. Increase the frequency of the review may be by increasing the number of satellites in the

orbital grouping, increasing the width of the span or changing the instantaneous field of view. To increase the efficiency of the use of space systems for remote sensing of the Earth are invited to use the radar system with all-round visibility. When using circular viewing angles while maintaining supervision at which operates radar system, the instantaneous field of view takes the form of a ring with the center in the sub-satellite point.

To compare the effectiveness of using remote sensing spacecraft radar observations of the Earth with various forms of instantaneous field of view, computing coverage ratio were produced (the proportion of the Earth's surface, which viewed by spacecraft) for a different number of turns, and the resulted comparative analysis of time sufficient examination given latitude belt. Calculations were performed using the simulation of the spacecraft flight, which takes into account the dimensions and shape of the instantaneous field of view, its position relative to the track of the spacecraft flight, spacecraft flight is modeled taking into account the disturbing forces.

The results of calculations indicate that the frequency and, consequently, the efficiency of viewing the Earth's surface is significantly affected by the instantaneous field of view. In order to improve the use of space systems for remote sensing radar of the Earth observation it is advisable to consider the establishment of an onboard radar system of the circular view.

Keywords: Earth remote sensing, side view, target equipment, on-board radar system, circular review.

Введение. Дистанционное зондирование – процесс, при котором собирается информация об объекте, территории или явлении без непосредственного контакта с ним. В последнее время особое значение приобретает космическая съёмка земной поверхности, которая производится с космических аппаратов (КА). Космические снимки находят применение как в практической, так и в научной сфере [1].

Огромная роль отводится космическим системам наблюдения при создании топографических карт различного масштаба, при этом информация дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ) позволяет оперативно оценивать происходящие изменения и проводить обновление данных для геоинформационных систем. Можно выделить основные направления использования информации ДЗЗ, получаемой космическими системами наблюдения: сельское хозяйство, климатология, поиск полезных ископаемых и энергоносителей, землепользование, наблюдение состояния морей и океанов, лесное хозяйство, контроль водных ресурсов, мониторинг чрезвычайных ситуаций, видо-вая военная разведка [2].

ДЗЗ является одним из приоритетных направлений развития российской космонавтики в настоящее время. Вектор его развития должен быть направлен на создание и комплексное использование спутниковой группировки ДЗЗ, обеспечивающей стратегическую независимость России в космической информации. Приоритетность развития космических средств ДЗЗ актуализирована стратегическими интересами России в космосе, обусловленными широким спектром внутренних, внешних, природных и техногенных вызовов [3].

Принцип дистанционных методов основан на интерпретации результатов измерения электромагнитного излучения, которое отражается либо излучается объектом и регистрируется в некоторой удалённой от него точке пространства.

В настоящее время значительное развитие получили космические аппараты радиолокационного наблюдения. Радиолокационные снимки получают при активном методе съёмки, когда антенна съёмочной системы генерирует радиоизлучение, оно отражается поверхностью и улавливается регистрирующей аппаратурой. Основное достоинство радиолокационной съёмки – её

всепогодность: она очень удобна для исследования океана (его волнения, загрязнения [4–7]).

Термины и определения. Под обзором поверхности Земли понимается наблюдение поверхности Земли с помощью аппаратуры, установленной на борту КА [8; 9]. Множество точек поверхности Земли, осматриваемых КА в данный момент, называется мгновенной зоной обзора (МЗО) [10].

Эффективность использования космических систем дистанционного зондирования Земли оценивается разрешающей способностью и периодичностью наблюдения. Повысить периодичность обзора можно путём увеличения количества космических аппаратов в орбитальной группировке, увеличения ширины полосы обзора или путем изменения мгновенной зоны обзора.

При движении КА по орбите МЗО перемещается по поверхности Земли. Геометрическое место МЗО называется полосой обзора. Границами полосы обзора являются огибающие МЗО. Геометрической характеристикой полосы обзора является ширина полосы обзора (ШПО).

КА ДЗЗ радиолокационного наблюдения используют односторонний или двусторонний боковой обзор [11–13]. Отражение сигнала зависит от рельефа поверхности, её шероховатости, структуры. Особенность бокового обзора, присущая КА радиолокационного наблюдения, заключается в том, что не осматривается поверхность под КА – заданный отступ от трассы (рис. 1). На рис. 2 показана поверхность Земли, которая осматрена при двустороннем боковом обзоре за один виток КА.

Для увеличения эффективности космических систем (КС) ДЗЗ предлагается использовать радиолокационный комплекс (РЛК) с круговым обзором. При использовании кругового обзора с сохранением углов наблюдения, при которых работает РЛК, МЗО принимает форму кольца с центром в подспутниковой точке (рис. 3). При круговом обзоре увеличивается ШПО (к поверхности Земли, которая осматривается при двустороннем боковом обзоре, добавляется поверхность, которая находится около трассы КА и не осматривается при двустороннем боковом обзоре).

При перемещении круговой мгновенной зоны обзора образуется полоса осмотра с большей шириной, нежели при двустороннем боковом осмотре (рис. 4).

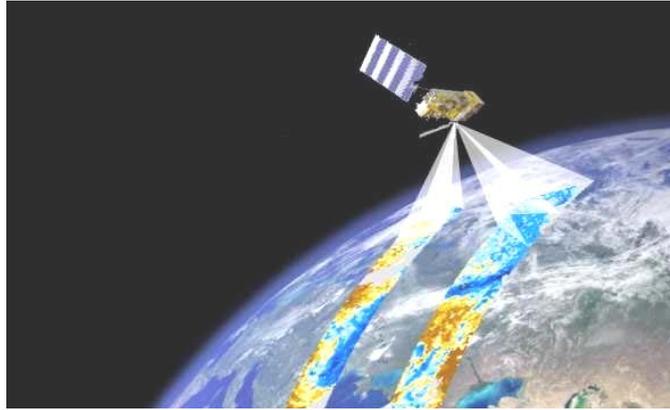


Рис. 1. Боковой обзор

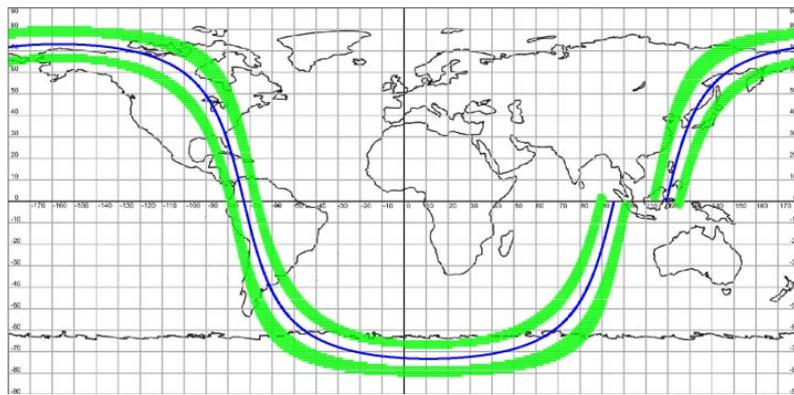


Рис. 2. Поверхность Земли, которая осмотрена при двустороннем боковом обзоре за один виток КА

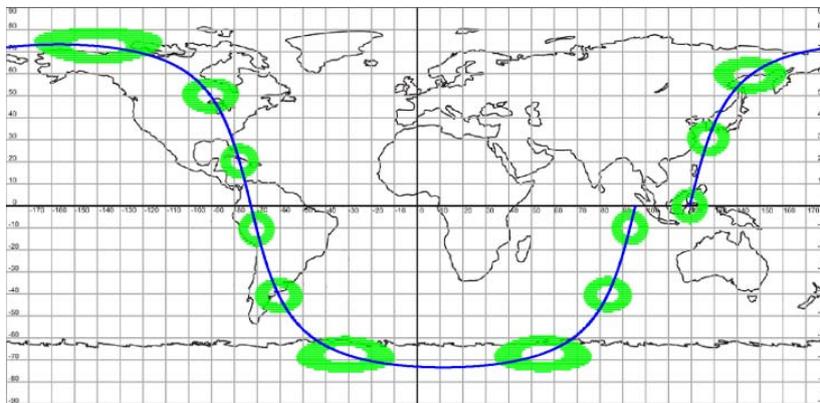


Рис. 3. МЗО КА с РЛК при круговом обзоре для различных моментов времени

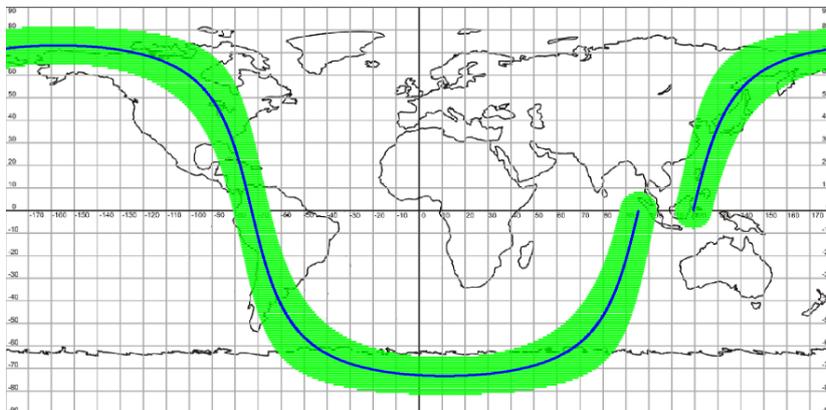


Рис. 4. Поверхность Земли, которая осмотрена при круговом обзоре за один виток КА

Сравнение эффективности. Для сравнения эффективности обзора были проведены расчёты коэффициента покрытия (доля осматриваемой земной поверхности) для различных форм МЗО. Расчёт производится с помощью алгоритма оценки эффективности обзора поверхности Земли.

Алгоритм оценки эффективности обзора поверхности Земли реализован на языке высокого уровня C++. Основные положения алгоритма:

- учитываются размеры и формы МЗО, её расположение относительно трассы;
- полёт КА моделируется с учётом возмущающих сил [14; 15];
- вся полоса обзора рассчитывается как сумма МЗО (за вычетом уже осматриваемых областей).

Обычно предполагают, что бортовая аппаратура обеспечивает обзор части пространства, ограниченной поверхностью кругового конуса с углом полураствора, равным углу обзора бортовой аппаратуры. В этом случае на поверхности шарообразной Земли получаем круговую зону обзора, размеры которой характеризуются геоцентрическим углом.

Перед началом расчёта задаётся орбита космического аппарата с помощью кеплеровских элементов, начальное положение космического аппарата, а также угол полураствора бортовой аппаратуры, задаётся

время расчёта. Далее, с заданным шагом расчёта определяются геометрические размеры мгновенной зоны обзора и её положение на поверхности Земли. После этого на каждой широте определяются долготы, которые попадают в область мгновенной зоны обзора. По окончании заданного времени вычисляется коэффициент покрытия, который равен отношению площади поверхности Земли, которая осматривается орбитальной группировкой, ко всей площади поверхности Земли.

В качестве расчётной орбиты используется круговая орбита с наклонением $i = 73$, высотой $h = 475$ км. ШПО – 500 км, отступ от трассы – 400 км. Результаты расчёта приведены в табл. 1.

На рис. 5 и 6 показана поверхность Земли, которая осматривается за пять витков КА при двустороннем боковом и круговом обзоре соответственно.

Для осмотра всей поверхности Земли в широтном поясе $[-80; 80]$ одному КА с круговым обзором необходимо 70 часов, а одному КА, использующему двусторонний боковой обзор, – 110 часов.

В табл. 2 показано количество КА в орбитальной группировке, необходимое для того, чтобы осматривать любую точку в широтном поясе $[-80; 80]$ с заданным периодом.

Таблица 1

Результаты расчёта

Способ обзора	Коэффициент покрытия, %			
	за 1 виток	за 2 витка	за 3 витка	за 5 витков
Односторонний боковой	3,73	7,22	10,68	18,13
Двусторонний боковой	7,46	13,92	20,09	31,46
Круговой	14,35	24,8	35,19	55,43

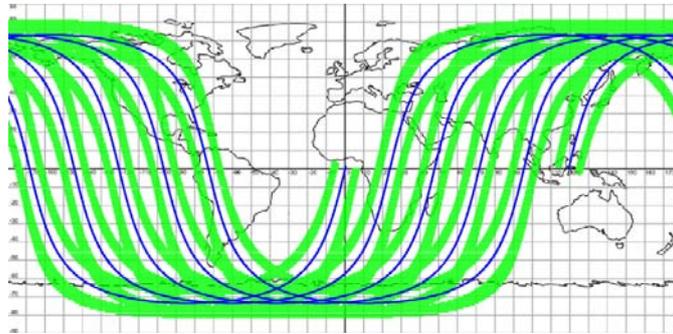


Рис. 5. Поверхность Земли, которая осматривается при двустороннем боковом обзоре за пять витков КА

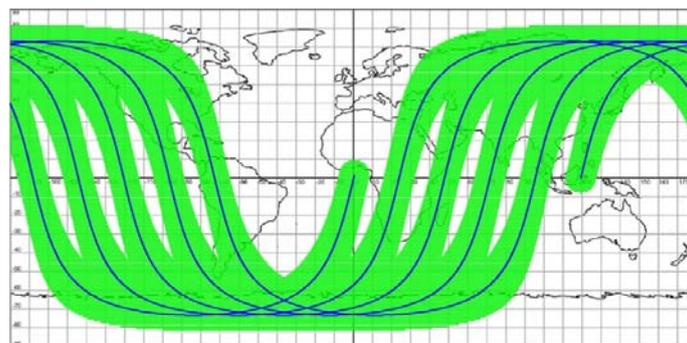


Рис. 6. Поверхность Земли, которая осматривается при круговом обзоре за пять витков КА

Количество КА

Способ обзора	Период обзора				
	4 часа	6 часов	8 часов	10 часов	12 часов
Двусторонний боковой	28	18	15	12	10
Круговой	10	8	6	6	4

Заключение. На эффективность землеобзора существенное влияние оказывает форма МЗО. При использовании РЛК кругового обзора повышается периодичность обзора. При заданной периодичности обзора, используя круговой обзор, сокращается количество КА в орбитальной группировке. В целях повышения эффективности работы КС ДЗЗ целесообразно рассмотреть возможность создания бортового РЛК кругового обзора.

Библиографические ссылки

1. Сутырина Е. Н. Дистанционное зондирование Земли. Иркутск : Изд-во ИГУ, 2013. 165 с.
2. Бакланов А. И. Системы наблюдения и мониторинга. М. : БИНОМ, 2012. 234 с.
3. Дистанционное зондирование Земли. Специальное приложение к журналу «Российский космос». М., 2012. 68 с.
4. Гарбук С. В., Гершензон В. Е. Космические системы дистанционного зондирования Земли. М. : Издательство А и Б, 1997. 296 с.
5. Рис У. Г. Основы дистанционного зондирования. М. : Техносфера, 2006. 346 с.
6. Кашкин В. Б. Дистанционное зондирование Земли из космоса. М. : Логос, 2011. 264 с.
7. Козинцев В. И. Оптико-электронные системы экологического мониторинга природной среды. М. : МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2002. 528 с.
8. Власов С. А., Мамон П. А. Теория полёта космических аппаратов. СПб. : ВКА им. А. Ф. Можайского, 2007. 435 с.
9. Власов С. А. Основы баллистического проектирования систем космических аппаратов землеобзора. СПб. : МО РФ, 1998. 94 с.
10. Можаяев Г. В. Синтез орбитальных структур спутниковых систем. М. : Машиностроение, 1989. 304 с.
11. Радиолокационные системы землеобзора космического базирования / В. С. Верба [и др.] М. : Радиотехника, 2010. 680 с.
12. Кондратенков Г. С., Фролов А. Ю. Радиолокационные системы дистанционного зондирования Земли. М. : Радиотехника, 2005. 368 с.
13. Радиолокационные станции с цифровым синтезом апертуры антенны / В. Н. Антипов [и др.] М. : Радио и связь, 1988. 304 с.
14. Эльясберг П. Е. Введение в теорию полёта искусственных спутников Земли. М. : ЛИБРОКОМ, 2011. 544 с.
15. Tapley B. D., Schutz B. E., Born G. H. Statistical Orbit Determination. Elsevier Academic Press, 2004. 547 p.

References

1. Sutyryna E. N. *Distantionnoye zondirovanie Zemli* [Remote sensing of the Earth]. Irkutsk, IGU Publ., 2013, 165 p.

2. Baklanov A. I. *Sistemy nablyudeniya i monitoringa* [Surveillance and monitoring systems]. Moscow, BINOM Publ., 2012, 234 p.

3. *Distantionnoye zondirovanie Zemli. Spetsial'noe prilozhenie k zhurnalu "Rossiyskiy kosmos"* [Remote sensing of the Earth. A special supplement to the journal "Russian Space"]. Moscow, 2012, 68 p.

4. Garbuk S. V., Gershenzon V. E. *Kosmicheskiye sistemy distantionnogo zondirovaniya Zemli* [Space Systems of remote sensing of the Earth]. Moscow, Izdatel'stvo A i B Publ., 1997, 296 p.

5. Ris U. G. *Osnovy distantionnogo zondirovaniya* [Physical Principles of Remote Sensing]. Moscow, Technosfera Publ., 2006, 346p.

6. Kashkin V. B. *Distantionnoye zondirovaniye Zemli iz kosmosa* [Remote sensing of the Earth from space]. Moscow, Logos Publ., 2011, 264 p.

7. Kozincev V. I. *Optiko - elektronnyye sistemy ekologicheskogo monitoringa prirodnoy sredy* [Opto - electronic system of ecological monitoring of the environment]. Moscow, MSTU N. E. Bauman Publ., 2002, 528 p.

8. Vlasov S. A., Mamon P. A. *Teoriya poletov kosmicheskikh apparatov* [Spacecraft flight theory]. St.Petersburg, VKA im. A. F. Mozhayskogo, 2007, 435 p.

9. Vlasov S. A. *Osnovy ballisticheskogo proyektirovaniya sistem kosmicheskikh apparatov zemleobzora* [Basics of ballistic designing spacecraft systems of the Earth view]. St. Petersburg, MO RF Publ., 1998, 94 p.

10. Mozhaev G. V. *Sintez orbital'nykh struktur sputnikovyx sistem* [Synthesis of orbiting structures of satellite systems]. Moscow, Mashinostroyeniye Publ., 1989, 304 p.

11. Verba V. S., Neronsky L. B., Osipov I. G., Turuk V. E. *Radiolokatsionnyye sistemy zemleobzora kosmicheskogo bazirovaniya* [Space-based radar systems of the Earth review]. Moscow, Radiotekhnika Publ., 2010, 680 p.

12. Kondratenkov G. S., Frolov A. Y. *Radiolokatsionnyye sistemy distantionnogo zondirovaniya Zemli* [Radar remote sensing systems of the Earth]. Moscow, Radiotekhnika Publ., 2005, 368 p.

13. Antipov V. N., Goryainov V. T., Kulin A. N. *Radiolokatsionnyye stantsii s tsifrovym sintezirovanyem apertury anteny* [Radar digital synthetic aperture antenna]. Moscow, Radio i svyaz' Publ., 1988, 304 p.

14. Elyasberg P. E. *Vvedeniye v teoriyu polota iskusstvennykh sputnikov Zemli* [Introduction to the theory of flight of artificial satellites]. Moscow, LIBROKOM, 2011, 544 p.

15. Tapley B. D., Schutz B. E., Born G. H. Statistical Orbit Determination. Elsevier academic press, 2004, 547 p.