

УДК: 52.626+52.852+520.34

**В. П. Кузьков, М. М. Медведский, Д. Я. Яцкив, В. Н. Недашковский,
Ю. М. Глущенко, В. Р. Суберляк, М. М. Перетятко, Н. А. Еременко**

Головна астрономічна обсерваторія Національної академії наук України, Київ

Подготовка к экспериментам по оптической связи с геостационарным спутником ARTEMIS

Надійшла до редакції 17.04.03

Зроблено розрахунки апаратури для проведення експериментів лазерного каналу зв'язку з геостационарним супутником ARTEMIS. Запропоновано схему експериментів з одночасним використанням двох типових телескопів. Наведено результати спостережень супутника.

ВВЕДЕНИЕ

Наземные системы передачи информации с использованием воздушных лазерных каналов связи в настоящее время интенсивно развиваются. Довольно эффективно они используются на небольших расстояниях для решения проблемы «последней мили» в системах коммуникации, обеспечивая скорости передачи информации 2 Мбит/с—2.5 Гбит/с и конкурируя с радиосистемами. Однако особое преимущество такие системы имеют в открытом космосе на больших расстояниях, где нет влияния атмосферы на распространение лазерного излучения. В сравнении с радиоканалами связи они обеспечивают сверхузкую диаграмму направленности при малых габаритах и энергопотреблении приемно-передающей системы при скоростях передачи до нескольких Гбит/с. Они также необходимы и для многофункциональных и многоканальных систем высокого разрешения дистанционного зондирования земной поверхности (ДЗЗ) и ближнего космоса, где необходимо передавать большие объемы информации в квазиреальном масштабе времени [1, 2].

Ведущие космические агентства разрабатывают и испытывают лазерные системы связи. Так, NASA (США) и NASDA (Япония) подготовили и провели эксперименты по передаче информации со ско-

ростью 1 Мбит/с лазерным каналом связи между наземной станцией и низкоорбитальным спутником ETS-VI в 1994—1996 г. В 1998 г. Европейским космическим агентством (ESA) был запущен ДЗЗ-спутник SPOT-4 с лазерным терминалом связи для взаимодействия с геостационарным спутником. Разработка космических систем лазерной связи начата и в Российском космическом агентстве. Подготавливается эксперимент NASDA по передаче информации со скоростью 2.5 Гбит/с по лазерному каналу связи с Международной космической станцией (МКС) на наземный пункт.

Для проведения экспериментов с лазерными каналами связи Европейским космическим агентством 12 июля 2001 г. был запущен спутник ARTEMIS (Advanced Relay and TEchnology MISSION) с лазерным терминалом связи SILEX (Semiconductor Laser Inter Satellite Link Experiment) на борту для приема больших объемов информации с низкоорбитального спутника SPOT-4 и проведения экспериментов с оптической наземной станцией (OGS) при несимметричном трафике 2 Мбит/с и 50 Мбит/с. Из-за нештатной работы третьей ступени ракеты-носителя после ряда корректировок спутник был выведен на круговую промежуточную орбиту высотой 31000 км, и с этой орбиты проводилось постепенное «поднятие» его

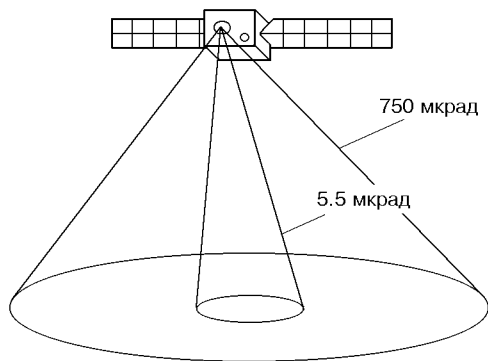


Рис. 1. Характеристики лазерных лучей ARTEMIS

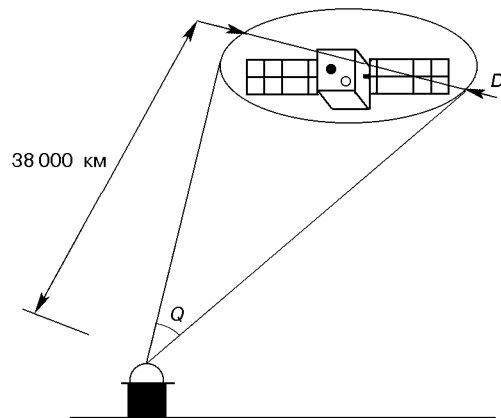


Рис. 2. Облученность спутника на орбите

орбиты с использованием бортовых ионных двигателей до геостационарного уровня. Тем не менее уже с этой промежуточной орбиты в ноябре 2001 г. были успешно проведены эксперименты по приему-передаче информации по лазерному каналу со спутника SPOT-4 и ретрансляции ее по радиоканалу на наземную станцию [4]. Также были проведены эксперименты по приему-передаче информации по лазерному каналу между спутником и OGS ESA на Канарских островах [3]. 31 января 2003 г. спутник был выведен в запланированную точку геостационарной орбиты над 21.5° в. д. Предполагаемый ресурс спутника 10 лет.

После согласования с менеджерами ESA соответствующими расчетами было показано, что аналогичные эксперименты по приему-передаче информации лазерным каналом связи и исследованию влияния атмосферы на распространение лазерного излучения между геостационарным спутником и наземной станцией можно проводить с использованием обычных астрономических телескопов.

Описание наших работ по подготовке к экспериментам с этим спутником проводится в последующем изложении.

ОБЩИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ЛАЗЕРНЫХ КАНАЛОВ СПУТНИКА ARTEMIS

Наведение бортового спутникового оптического терминала на наземную станцию осуществляется в несколько этапов. Маяк спутника сканирует по земной поверхности лучом в диапазоне $\lambda\lambda = 797\text{—}808$ нм и расходимостью 750 мкрад. При этом освещенность земной поверхности составляет около 2.4 нВт/м². На наземной станции прежде всего

необходимо принять сигнал от поискового маяка спутника (рис. 1) и послать на спутник лазерный сигнал-репер, по которому осуществляется наведение узкого коммуникационного луча со спутника на наземную станцию. После точного наведения узкого коммуникационного лазерного луча на наземную станцию и «захвата» лазерного коммуникационного луча с наземного телескопа начинается фаза передачи оптических информационных сигналов. От спутника исходит узкий (5.5 мкрад) коммуникационный луч в диапазоне $\lambda\lambda = 815\text{—}825$ нм со скоростью передачи 2.048 Мбит/с с применением 2PPM-модуляции, который обеспечивает освещенность наземной станции около 40 нВт/м². Наземная оптическая станция должна обеспечить наведение ответного коммуникационного луча на спутник со скоростью передачи 50 Мбит/с при NRZ-модуляции в диапазоне $\lambda\lambda = 843\text{—}852$ нм, обеспечивая плотность потока на геостационарной орбите спутника на уровне 90 нВт/м², не превышая максимально разрешаемую плотность облучения 900 нВт/м² (рис. 2).

ОСВЕЩЕННОСТЬ НА УРОВНЕ СПУТНИКА ОТ НАЗЕМНОГО ЛАЗЕРНОГО ИСТОЧНИКА

Очевидно, что освещенность E спутника на его орбите (рис. 2) будет определяться выражением

$$E = P_L / [\pi L^2 \sin^2(Q/2)], \quad (1)$$

где P_L — мощность наземного лазера, L — расстояние до спутника, Q — расходимость лазерного луча на выходе объектива.

Как видно из выражения (1), освещенность спутника сильно зависит от расходимости лазерного

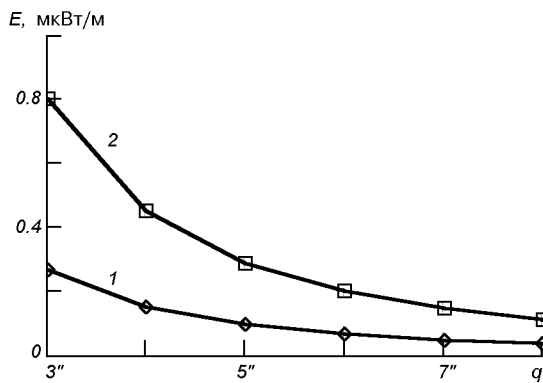


Рис. 3. Расчетная освещенность спутника E от расходимости лазерного пучка Q (") с учетом потерь в согласующей оптике и земной атмосфере при исходящей мощности лазера 200 мВт (треугольник) и 600 мВт (квадратик)

Расчетная освещенность спутника

Q , "	$E_{1,1}$, нВт/м ²	$E_{1,2}$, нВт/м ²
3	267	800
4	150	450
5	96	288
6	67	200
7	49	147
8	38	113

излучения. К этому добавляются потери в согласующей оптике и земной атмосфере. Так, при мощности полупроводникового лазерного диода 200 мВт и наличии трехлинзовой коллимирующей системы лазера с коэффициентом пропускания 0.9 и согласующего зеркала с коэффициентом отражения 0.9 получим на входе телескопа мощность лазерного излучения $P_{\text{д}} = 131$ мВт. При использовании двухзеркальной касегреновской системы телескопа с коэффициентом отражения зеркал 0.8 получаем мощность лазерного излучения на выходе телескопа $P_{\text{т}} = 84$ мВт.

Потери, связанные с поглощением в земной атмосфере, определяются рассеиванием излучения на пыли и аэрозолях, атомарным и молекулярным поглощением. Так как рассеяние света подчиняется закону $1/\lambda^4$, то в относительно чистой атмосфере на длине волны 800 нм ослабление излучения на единичной воздушной массе составит лишь $0.02^{\text{м}}$. Коэффициент пропускания атмосферы средней запыленности при содержании паров воды эквивалентным 5 мм в зените составляет 0.94. Так как спутник находится геостационарной точке 21.5° , то для нашей широты он наблюдается на зенитном угле 60° . В этом случае увеличивается воздушная

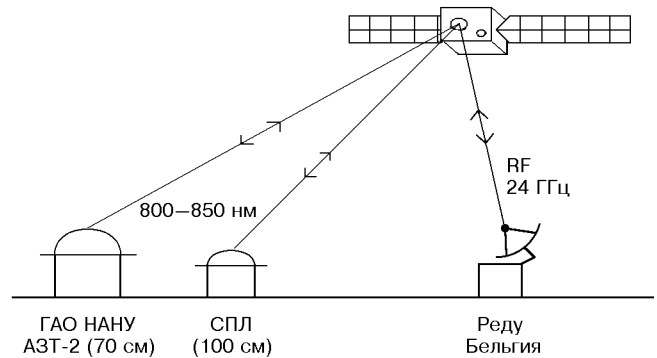


Рис. 4. Схема экспериментов между ГАО НАНУ и станцией связи в г. Реду (Бельгия)

масса, проходящая излучением, что приводит к дополнительному ослаблению лазерного излучения на $0.23^{\text{м}}$. Несложные вычисления приводят к мощности 64 мВт в пучке лазера за пределами атмосферы. Другими словами, потери мощности лазера на оптических элементах и в атмосфере приводят к ослаблению первоначальной мощности лазера оценочно в 3.1 раза.

Результаты вычисления (1) освещенности геостационарного спутника при наклонной дальности до спутника 38000 км, исходной мощности лазера 200 мВт и 600 мВт приведены в таблице и на (рис. 3). Как видно из таблицы, необходимая величина освещенности не менее в 90 нВт/м², соответствующая ошибкам передачи на уровне 10^{-6} , обеспечивается при мощности лазера в 600 мВт в диапазоне расходимостей лазерного пучка от 3" до 8", в то время как при мощности лазера в 200 мВт — лишь в узком пучке 3—5".

Эти расчеты выполнены без учета потерь, связанных с турбулентностью атмосферы, отклоняющей или рассеивающей лазерный пучок. Эти потери определяются характерными радиусами турбулентности в атмосфере и диаметром проходящего их лазерного пучка. Поэтому реальную мощность лазера необходимо увеличивать до 800—900 мВт.

ПРЕДЛОЖЕННАЯ СХЕМА ЭКСПЕРИМЕНТОВ

Для коммуникационных экспериментов «геостационарный спутник — наземная станция» особенно важны сравнительные характеристики исследования прохождения лазерного излучения через атмосферу, сравнительные характеристики прохождения импульсного лазерного излучения через атмосферу над Атлантикой по пути ARTEMIS — OGS

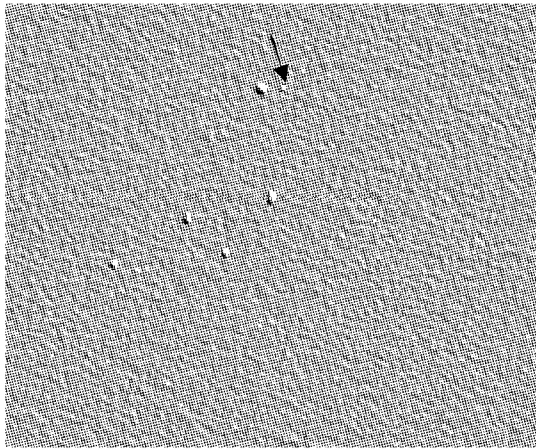


Рис. 5. Изображение спутника ARTEMIS после обработки

ESA и континентальной атмосферой по пути ARTEMIS — Киев.

Подготовка к экспериментам со спутником ARTEMIS проводилась на двух телескопах ГАО: 0.7 м астрономическом телескопе АЗТ-2 и станции спутниковой локации СПЛ с диаметром главного зеркала 1 м (рис. 4). Возможны как отдельная работа каждого из телескопов, так и совместная их работа с частичным использованием функций. То есть, один из телескопов может работать на стадии наведения, а другой — в коммуникационной фазе, или один из телескопов может работать на передаче, а второй — на прием информации.

При успешном завершении экспериментов по отработке фазы наведения на спутник, будут проведены также эксперименты по приему лазерного сигнала от спутника ARTEMIS и по передаче оптического лазерного сигнала на спутник с последующей ретрансляцией этих сигналов по радиоканалу в Ка-диапазоне (20–30 ГГц) на наземный пункт в г. Реду (Бельгия). Максимально возможная скорость передачи канала спутник — наземная станция равна 2 Мбит/с, а в обратном направлении — 50 Мбит/с.

Для совместной работы двух телескопов с частичным их использованием и разделением функций оба телескопа соединены между собой через компьютерный сервер модемной связью со скоростью передачи 33.6 Кбит/с.

Опыт наблюдения геостационарных спутников в ГАО НАНУ показывает, что их визуальная звездная величина составляет 11–15^m. Для определения возможности гидирования спутника ARTEMIS проводились его визуальные наблюдения с помощью 20-см гида телескопа АЗТ-2, а также получены его

изображения с помощью CCD-камеры с ЕОП в 12-см гида телескопа СПЛ (рис. 5).

Оказалось, что спутник имеет визуальную величину 10–11^m, и планируемые эксперименты по оптической связи наземный телескоп — спутник ARTEMIS можно провести при теперешнем положении спутника в запланированной точке геостационарной орбиты.

На телескопе АЗТ-2 размещение приемно-передающего блока предполагается осуществить в каскадном фокусе. При разработке оптической приемно-передающей аппаратуры использованы основные идеи концепции многоканальной приемной системы, разработанной для МКС. Там также предусматривался лазерный канал для экспериментов по активному просвечиванию атмосферы и оптической передаче информации [1, 2].

Так как СПЛ работает в зеленом участке видимого диапазона длин волн [5], необходима доработка телескопа для работы в ближнем ИК-диапазоне. При этом будут использоваться ответвления гида фокуса кудэ телескопа.

Проведена конструкторская разработка фотоприемного блока с использованием кремниевого лавинного фотодиода с термоэлектрическим охлаждением, что позволило достичь необходимой пороговой чувствительности приемного тракта на уровне 0.15 нВт при полосе пропускания электронного тракта 8 МГц. Также разработан лазерный передающий модуль с использованием полупроводникового лазера оптической мощностью в несколько сот милливольт, при полосе пропускания электронного тракта не более 100 МГц.

Эти базовые конструкторские разработки и проработки оптико-механических систем сопряжения приемного и передающего каналов с телескопом являются существенным заделом для успешного выполнения дальнейших экспериментов по лазерной связи с геостационарным спутником ARTEMIS.

ВЫВОДЫ

1. Проведенные расчеты, конструкторские разработки приемных и передающих узлов лазерной связи, а также наблюдения спутника ARTEMIS свидетельствуют о возможности проведения экспериментов по коммуникационной лазерной связи с геостационарным спутником с помощью обычных астрономических телескопов.

2. Предложена схема выполнения экспериментов по коммуникационной лазерной связи с геостационарным спутником с одновременным использованием двух телескопов.

3. Наземно-космические каналы оптической связи перспективны для реализации их в многофункциональных и многоканальных космических системах высокого разрешения дистанционного зондирования земной поверхности и ближнего космоса, где необходимо передавать большие объемы информации в квази-реальном масштабе времени.

В заключение выражаем особую благодарность G. Oppenhaeuser, Z. Sodnik, T. Tolker-Nielsen — менеджерам и специалистам ESA за поддержку и внимание к нашим работам и предоставленный нам большой объем научно-технической информации по спутнику ARTEMIS.

Работа выполнялась при финансовой поддержке Национального космического агентства Украины.

1. Kuz'kov V. P., Eremenko N. A., Khymenko O. A., et al. Concept of a multichannel system installed at the ISS for study of the Earth's surface and atmosphere // *Космічна наука і технологія*.—2000.—6, № 4.—С. 65—67.
2. Kuz'kov V. P., Eremenko N. A., Khymenko O. A., et al. The concept of a multichannel system for surface, atmosphere investigations of the Earth and near space observations // *Proc. International Symposium "Interball"*. — Kiev: NSAU, 2000.— P. 77—80.

3. Reyes Garcia-Talavera M., Sodnik Z., Lopez P., et al. Preliminary results of the in-orbit test of ARTEMIS with the Optical Ground Station // *Proc. SPIE*.—2002.—N 4635.—P. 38—49.
4. Tolker-Nielsen T., Oppenhaeuser G. In-orbit test result of an operational optical intersatellite link between ARTEMIS and SPOT4, SILEX // *Proc. SPIE*.—2002.—N 4635.—P. 1—15.
5. Yatskiv D. Ya, Medveskij M. M., Suberlyak V. R., Peretyatk M. M. Kyiv laser ranging station report on the experimental operation 1997—1998. Kiev, 1998.—P. 3—15.—(Preprint / MAO-98-6E).

PREPARATION FOR OPTICAL COMMUNICATION EXPERIMENTS WITH THE GEOSTATIONARY SATELLITE ARTEMIS

V. P. Kuz'kov, M. M. Medvedskii, D. Ya. Yatskiv,
V. N. Nedashkovskii, Yu. M. Gluschenko, V. R. Suberliak,
M. M. Peretiatio, N. A. Yeremenko

We considered necessary conditions and carried out corresponding calculations for performing laser communication link experiments with the geostationary satellite ARTEMIS (ESA). We propose a scheme for performing experiments of this kind by using two telescopes. The results of observations of the satellite are presented.