

УДК 520.34+520.6.05

В. П. Кузьков, В. Н. Недашковский

Головна астрономічна обсерваторія Національної академії наук України, Київ

Приемная система для лазерного воздушно-космического канала связи

Розглянуто необхідні вимоги та виконано відповідні розрахунки апаратури для проведення експериментів з прийому лазерного комунікаційного сигналу з геостационарного супутника ARTEMIS. Показано, що такі експерименти можна проводити з використанням 0.7-м типового телескопа. Наведено результати розробки приймальної апаратури з використанням кремнійового лавинного фотодіода.

ВВЕДЕНИЕ

Воздушно-космические лазерные системы связи имеют некоторые преимущества над радиосистемами связи, особенно в космосе на больших расстояниях. Так, при относительно небольших размерах приемно-передающих систем они имеют диаграмму направленности несколько угловых секунд. Радиосистемы связи не могут создать такую узкую диаграмму направленности, а поэтому для обеспечения необходимой плотности потока излучения необходимо применять более мощный передатчик. Более того, реально созданные наземные системы лазерной связи позволяют передавать информацию со скоростью 1—10 Гбит/с на один канал, в то же время как радиосистемы обеспечивают скорость передачи информации лишь 100—200 Мбит/с на канал.

Ведущие космические агентства мира разрабатывают и испытывают лазерные системы связи. Так, NASA (США) и NASDA (Япония) провели эксперименты по передаче информации со скоростью 1 Мбит/с лазерным каналом связи между наземной станцией и низкоорбитальным спутником ETS-VI в 1994—1996 гг. Ведется подготовка экспериментов NASDA по передаче информации со скоростью 2.5 Гбит/с по лазерному каналу связи с Международной космической станцией (МКС) на наземный пункт. В 1998 г. Европейским космическим агентством (ESA) был запущен ДЗЗ-спутник SPOT-4 с лазерным терминалом на борту для взаимодействия с геостационарным спутником. Для проведения

экспериментов по лазерным каналам связи Европейским космическим агентством (ESA) 12 июля 2001 г. был запущен спутник ARTEMIS с лазерным терминалом связи SILEX (Semiconductor Laser Inter Satellite Link Experiment) на борту для приема больших объемов информации с низкоорбитального спутника SPOT-4 в квазиреальном масштабе времени и проведения экспериментов с наземной оптической станцией (OGS) ESA. Из-за нештатной работы 3-й ступени ракеты носителя спутник был сначала выведен на круговую промежуточную орбиту высотой 31000 км, и с этой орбиты проводилось постепенное «поднятие» орбиты с использованием бортовых ионных двигателей до геостационарного уровня. Тем не менее, 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. Так же были проведены эксперименты по приему-передаче информации по лазерному каналу между спутником и OGS ESA на Канарских островах [4].

Этими экспериментами начата новая эпоха в практической космонавтике с применением лазерных систем связи. Фактически можно говорить о том, что конструирование новых спутниковых систем дистанционного зондирования Земли (в том числе и в Украине), где нужно передавать большие объемы информации, можно проводить с учетом возможности использования ретрансляции информации по скоростному лазерному каналу связи.

Будущие отдаленные космические миссии планируются с учетом возможности использования скоростных лазерных каналов связи с геостационарным спутником или с приближенной к Земле ретрансляционной платформой.

31 января 2003 г. спутник ARTEMIS был доведен до запланированной точки геостационарной орбиты над 21.5° в. д. Планируемый ресурс спутника 10 лет.

После согласования с менеджерами ESA и соответствующих расчетов 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 [1, 2]. Описание разработки приемной системы для экспериментов по лазерному каналу связи между геостационарным спутником и наземной телескопической системой проводится ниже.

ХАРАКТЕРИСТИКИ ПРИНИМАЕМОГО ЛАЗЕРНОГО СИГНАЛА

Согласно данным, предоставленным специалистами ESA величина плотности энергии коммуникационного лазерного сигнала от спутника на уровне земной поверхности без учета поглощения в атмосфере составляет 40 нВт/м² в спектральном диапазоне $\lambda\lambda = 816...823$ нм. Скорость передачи информации 2.048 Мбит/с при использовании 2PPM-модуляции. Для работы системы наведения спутника на наземную станцию на него необходимо передавать оптический сигнал со скоростью 49.372 Мбит/с и модуляцией NRZ в спектральном диапазоне $\lambda\lambda = 843...852$ нм, обеспечив плотность потока излучения на уровне геостационарного спутника в районе 60—90 нВт/м².

Приняв поглощение принимаемого излучения в зените на единичной воздушной массе равным 0.07^m и учитывая, что наблюдения спутника на нашей широте проводится на зенитных углах 60°, получим, что плотность потока коммуникационного лазерного луча на входе телескопа составит 35 нВт/м². При использовании касегреновской телескопической системы с диаметром первичного зеркала 0.7 м и соответственно площадью 0.385 м², и считая коэффициент отражения двух зеркал телескопа равным 0.85, получаем значение принимаемого лазерного сигнала на входе оптико-механического блока 9.8 нВт.

ОПТИКО-МЕХАНИЧЕСКИЙ БЛОК ЛАЗЕРНОГО КАНАЛА СВЯЗИ

Приемно-передающая оптико-механическая система для касегреновского фокуса телескопа АЗТ-2 разработана для экспериментов с геостационарным спутником. Она состоит из активного лазерного передающего устройства (LD), приемного блока (APD) с использованием кремниевого лавинного фотодиода в качестве приемника излучения и оптико-механических элементов (рис. 1). Для подсмотра диафрагмы фотоприемника и наведения на спутник использована CCD камера с количеством пикселей 795Н×596V (чип «Sony») и чувствительностью 10⁻⁴ люкс при скорости считывания 25 кадров/с.

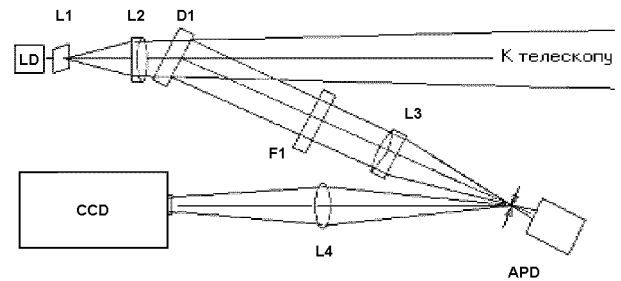


Рис. 1. Оптическая схема оптико-механического блока. LD — полупроводниковый лазерный диод, APD — лавинный кремниевый фотодиод, D1 — дихроичный элемент для разделения принимаемого и передаваемого сигналов, L1—L4 — линзы, F1 — фильтр, CCD (чип «Sony») 795Н×596V пкл

Если от телескопа приходит коммуникационный сигнал величиной 9.8 нВт при скорости передачи информации 2.048 Мбит/с и использовании 2PPM модуляции, то после прохождения через две линзы (L3 и линзы фабри перед APD) с пропусканием 0.95 и фильтра с пропусканием 0.8 получим величину сигнала на лавинном фотодиоде 7.1 нВт.

ХАРАКТЕРИСТИКИ ЛАВИННОГО ФОТОДИОДА ФД-311Л

Как известно, лавинные фотодиоды имеют коэффициент внутреннего усиления сигнала, достигающий 250 в отдельных отобранных экземплярах, позволяя работать и в режиме счета фотонов [3]. Но при большом усилении увеличиваются и внутренние шумы, что приводит к необходимости оптимизировать работу фотодиодов по максимальному соотношению сигнал/шум. Кроме этого, при большом

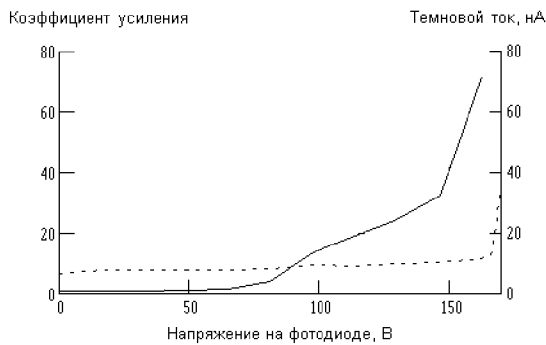


Рис. 2. Зависимость коэффициента усиления (штриховая кривая) и темнового тока (сплошная кривая) лавинного фотодиода от напряжения питания

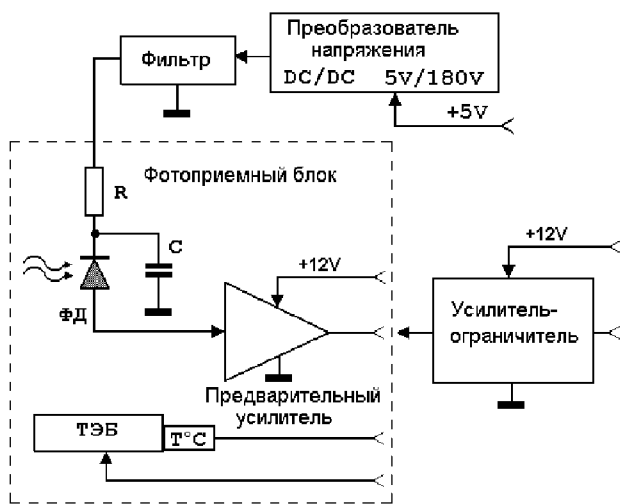


Рис. 3. Функциональная схема приемной системы

внутреннем усилении предъявляются жесткие требования к стабилизации напряжения питания и температуры ФД. Это показывают и графики зависимостей коэффициента внутреннего усиления и шумов фотодиода ФД-311Л от напряжения питания (рис. 2), снятых при температуре 22 °С. Как видно, оптимальным для этого фотодиода при данной температуре является внутреннее усиление около 80 единиц.

ФУНКЦИОНАЛЬНАЯ СХЕМА БЛОКА ФОТОПРИЕМНИКА

Блок фотоприемника состоит из блока предварительного усилителя с коэффициентом усиления



Рис. 4. Общий вид фотоприемного блока с лавинным ФД, предварительным усилителем и ТЭБ

12 дБ, окончного усилителя-ограничителя с коэффициентом усиления 39 дБ и блока регулируемого преобразователя напряжения со сглаживающим фильтром (рис. 3).

Предварительный усилитель вместе с лавинным фотодиодом, охлаждаемым термоэлектрической батареей (ТЭБ), и датчиком температуры размещен в герметичном металлическом боксе с зеркальной диафрагмой на входе. Преобразователь напряжения обеспечивает регулировку и стабилизацию напряжения в пределах 100—180 В. Выходное напряжение сглаживается фильтром низких частот, и через ограничительный резистор поступает на лавинный фотодиод. Термоэлектрическая батарея обеспечивает поддержание температуры фотоприемника в интервале 4—25 °С.

ФОТОПРИЕМНЫЙ БЛОК

Фотоприемный блок состоит из размещенных в герметичном корпусе предварительного усилителя с лавинным фотодиодом, однокаскадной термоэлектрической батареи для охлаждения фотоприемника и активного датчика температуры.

Как известно, максимальную пороговую чувствительность можно получить при достижении минимально узкой полосы принимаемого тракта. Однако лавинный фотодиод является источником тока с высоким внутренним сопротивлением, поэтому он нагружается на входное сопротивление предварительного усилителя, которое необходимо сделать максимально высоким для достижения максимального сигнала уже на входе предварительного усили-

теля. Наличие входных емкостей первого каскада усилителя приводит к необходимости оптимизации входного сопротивления усилителя для заданной полосы пропускания (8 МГц) электронного тракта. Расчет показал, что оптимальное входное сопротивление предварительного усилителя, соответствующее максимальному соотношению сигнал/шум, равно 6.5 кОм.

Измерения показали, что фотоприемный блок обеспечивает пороговую чувствительность на уровне 0.15 нВт при полосе пропускания предварительного усилителя 8 МГц и температуре фотоприемника 4 °С. При мощности принимаемого лазерного сигнала на уровне 7.1 нВт он обеспечивает соотношение сигнал/шум, равное 47. Общий вид фотоприемного блока с лавинным фотодиодом, предварительным усилителем и ТЭБ представлен на рис. 4.

ВЫВОДЫ

Разработанная приемная система с использованием приемного блока с охлаждаемым лавинным фотодиодом при пороговой чувствительности на уровне 0.15 нВт в полосе пропускания тракта 8 МГц обеспечит прием лазерного коммуникационного сигнала 2 Мбит/с при соотношении сигнал/шум, равном 47 при использовании кассегреновского фокуса телескопа АЗТ-2.

Эти параметры позволяют решать задачу приема коммуникационного лазерного сигнала с геостационарного спутника используя входные апертуры приемных оптических систем диаметром не более

0.7 м. При использовании более глубокого охлаждения фотоприемника возможно дальнейшее улучшение пороговых свойств системы.

Аналогичные приемные системы могут успешно использоваться и в наземных воздушных системах лазерной связи.

Работа выполнялась при финансовой поддержке Национального космического агентства Украины.

1. Кузьков В. П., Медведский М. М., Яцкив Д. Я. и др. Подготовка к экспериментам по оптической связи с геостационарным спутником ARTEMIS // Космічна наука і технологія.—2003.—9, № 4.—С. 79—83.
2. Kuz'kov V., Medvedskij M., Yatskiv D., et al. Preparation to optical communication experiments with ARTEMIS satellite. (Satellite as a guide star) // Poster. NATO / ASI Summer School «Optics in Astrophysics», Cargase, France, September 15–27, 2002.
3. PerkinElmer optoelectronics, 22001 Dumberry Road, Vandrenil, Quebec, Canada, J7V-8P7, 2001.
4. Reyes M., Sodnik Z., Lypez 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.

RECEIVING SYSTEM FOR AIR-SPACE LASER COMMUNICATION

V. P. Kuz'kov and V. N. Nedashkovskii

We analysed necessary conditions and carried out corresponding calculations for the performance of experiments on receiving laser communication signals from the geostationary satellite ARTEMIS. We show that experiments of this sort can be performed with the use of a 0.7-metre ordinary telescope. Our results concerning the design and investigation of a receiving system with silicon avalanche photodiode are presented.