

УДК 681.783:681.37

С. Е. Широбакин, И. В. Крюкова,
Н. Н. Чуковский, Г. Ю. Тананаев

НОВАЯ КОНЦЕПЦИЯ ПОСТРОЕНИЯ БОРТОВОЙ АППАРАТУРЫ МЕЖСПУТНИКОВЫХ ОПТИЧЕСКИХ ЛИНИЙ СВЯЗИ

Рассмотрена возможность уменьшения состава бортовой аппаратуры дуплексной межспутниковой оптической линии связи в результате применения новых мощных волоконно-оптических усилителей и перехода на полудуплексную передачу сигналов, целесообразную в линиях между низколетящим (информационным) спутником и спутником на геостационарной орбите (ретранслятором). Реализация предложений позволит существенно упростить традиционную структуру системы и оптическую схему, отказаться от системы упреждения, избавиться от разделения по длинам волны встречных потоков и требований к стабильности поляризации излучения, что обеспечит уменьшение в 2–3 раза массы и габаритных размеров аппаратуры и увеличение надежности системы.

За последние 30–35 лет во всем мире выполнено множество работ и исследований по созданию систем космической лазерной связи [1, 2]. Большое число исследований проводилось и в России [3–5]. Ожидается, что в ближайшие 5–10 лет системы космической лазерной телекоммуникации получат широкое распространение.

В настоящее время успешно эксплуатируются две дуплексные межспутниковые оптические линии связи (МОЛС) в диапазоне 0,8...0,9 мкм для передачи цифровых изображений с низколетящих спутников дистанционного зондирования Земли (НКА ДЗЗ) “SPOT-4” Европейского космического агентства и “OICETS” Космического агентства Японии на спутник-ретранслятор “ARTEMIS” на геостационарной орбите (ГКА РТР) Европейского космического агентства с последующей передачей информации на Землю в радиодиапазоне. Пропускная способность канала с НКА ДЗЗ в направлении на ГКА РТР составляет 50 Мбит/с. В обратном направлении передаются только команды со скоростью 2 Мбит/с [6].

Разработка аппаратуры этих линий началась в конце 80-х годов прошлого столетия. Этим объясняется такая низкая (по современным требованиям) пропускная способность передачи цифровых изображений, так как скорость ограничивалась максимальными мощностями (60 мВт) существующих в то время долговечных полупроводниковых одномодовых лазеров. Ограниченная мощность обуславливала применение оптических антенн диаметром 200...300 мм с диаграммами направленности излучения на передачу и прием около 4". Но такая сверхузкая диаграмма направленности приводила к усложнению всей бортовой аппаратуры. Так, она оказалась соизмеримой с

амплитудой вибраций на спутнике, что повлекло за собой включение в состав аппаратуры скоростного оптического дефлектора, компенсирующего колебания диаграмм антенны. Узкая диаграмма оказалась меньше угла упреждения, обусловленного взаимным перемещением спутников-корреспондентов за время прохождения сигнала между ними. Например, для расстояния между спутниками 80 000 км угол упреждения составляет максимально возможную величину в $17''$. Поэтому в аппаратуру вводится оптическая система, смещающая ось диаграммы излучения относительно оси приемной диаграммы, — устройство упреждения.

Для минимизации масс и габаритных размеров в рассматриваемой аппаратуре используется единая антенна для приема и передачи, что потребовало обеспечения развязки в аппаратуре между передаваемым и принимаемым сигналами ≈ 65 дБ. Эта развязка обеспечивается только при использовании между передаваемым и принимаемым сигналами разноса по длине волны и при применении взаимной ортогональной поляризации принимаемого и передаваемого сигналов внутри аппаратуры. Кроме того, из-за дефицита мощности необходимо применять призменный тракт передачи сигналов от оптических устройств к антенне, поскольку использование для этих целей оптоволокна увеличивает потери в тракте. В результате масса аппаратуры составила ≈ 150 кг, что в 2 раза меньше чем у аналогичной аппаратуры радиодиапазона. Такую аппаратуру можно назвать аппаратурой первого поколения. В работе [4] приведено описание одного из ее вариантов.

В последние годы было разработано новое поколение долговечных одномодовых полупроводниковых лазеров мощностью до 150...200 мВт. Используя их в аппаратуре с оптической системой первого поколения, вводя уплотнение каналов по длине волны и проводя более тщательную отработку оптико-механической системы, сегодня в России возможно обеспечить в МОЛС между НКА ДЗЗ и ГКА РТР более высокую пропускную способность в 622 Мбит/с и более (до 1,2 Гбит/с) при массе бортовой аппаратуры ≈ 70 кг. Такая работа была выполнена в МГТУ им. Н.Э. Баумана совместно с рядом промышленных предприятий [4, 5]. Эту аппаратуру можно обозначить как поколение “1+”.

За последнее время появились новые устройства — волоконно-оптические усилители (ВОУ), более мощные, чем одномодовые полупроводниковые лазеры. К настоящему времени они достигли высокого уровня отработки, что позволяет использовать их в спутниковой аппаратуре. Усилители могут работать в следующих диапазонах: 1,55 мкм — эрбиевый усилитель; 1,06 мкм — иттербиевый; 1,9 мкм — туллийевый. Выходная мощность в одной моде может достигать сотен ватт, усиление — 30...40 дБ; КПД достигает 25...30 %, срок службы — более 200 тыс. ч. Масса вместе с вспомогательными устройствами составляет 1...3 кг.

Исходя из этого, в настоящей работе предложен возможный путь создания нового поколения аппаратуры МОЛС на базе ВОУ и других современных достижений телекоммуникационной индустрии с учетом опыта, накопленного при разработке аппаратуры поколения “1+”. Применение мощных ВОУ

позволило максимально упростить бортовую аппаратуру системы космической связи.

Энергетические параметры систем и предельная дальность. *Выбор диапазона.* Диапазон 1,9 мкм исключается, так как для этого диапазона нет высокочувствительных скоростных фотоприемников.

Следующий диапазон — 1,06 мкм. Для этого диапазона фотоприемники делаются из кремния, и они наиболее чувствительны. К тому же, иттербиевый усилитель имеет КПД 28 %, что делает диапазон 1,06 мкм наиболее привлекательным в части энергетических параметров.

Диапазон 1,55 мкм гораздо безопаснее для людей, но чувствительность приемников меньше чем у кремниевых, а безопасность автоматической аппаратуры, предназначенной для работы в безлюдном космосе, не может явиться определяющим фактором. Поэтому наиболее целесообразным, по мнению авторов, является использование диапазона 1,06 мкм.

В предлагаемой аппаратуре МОЛС вследствие высокой мощности ВОУ появляется возможность расширить диаграммы излучения и приема до перекрытия ими угла упреждения до $18''$ и применить полудуплексный режим передачи (“пинг-понг”). Расширение диаграмм позволит исключить из состава аппаратуры скоростной оптический дефлектор и устройство упреждения. Кроме того, введение полудуплексного режима передачи информации даст возможность исключить жесткое требование по развязке между приемным и передающим информационными каналами и снять требование стабильности плоскости поляризации излучения, которое трудно выполнимо для ВОУ. Полудуплексный режим потребует увеличения скорости передачи в одном направлении до суммы скоростей встречных направлений. Но для МОЛС между НКА ДЗЗ и ГКА РТР это увеличение незначительно, так как обычно скорость в канале “сверху–вниз” составляет малую долю от скорости “снизу–вверх” и прирост скорости в одном направлении будет невелик. Исключение требований по развязке приемного и передающего каналов и высокие мощности ВОУ позволят выполнять все оптические связи между узлами каждого терминала оптическим волокном, что существенно упростит конструкцию аппаратуры.

Оценим необходимую мощность передатчика P_0 линии между НКА ДЗЗ и ГКА РТР. Принимаем: дальность $L = 40\,000$ км, апертуру приемной антенны $D = 0,25$ м, полный угол раскрытия пучка передатчика $\alpha = 80$ мкрад, коэффициент пропускания в передающем тракте аппаратуры $\tau_{\text{прд}} = 0,8$, в приемном тракте $\tau_{\text{прм}} = 0,7$, потери за счет неполной глубины модуляции $\tau_{\text{м}} = 0,9$. Чувствительность фотоприемника на ЛФД $P_{\text{ф}} = -40$ дБм. В аппаратуре предложено использовать диаграммы эллиптического поперечного сечения с отношением осей 2/1 и более, большая ось которых ориентирована по вектору скорости движения корреспондента в поле зрения и угловая ширина диаграммы по большой оси равна 80 мкрад. Это приведет к уменьшению необходимой мощности передатчика как минимум в $K_3 = 2$. Примем запас $M = 2$. При применяемом полосовом фильтре в приемном тракте с шириной пропускания на уровне 50 нм мощность фона не превышает 1...3 нВт,

что существенно меньше уровня сигнала, поэтому фон не учитываем. Таким образом,

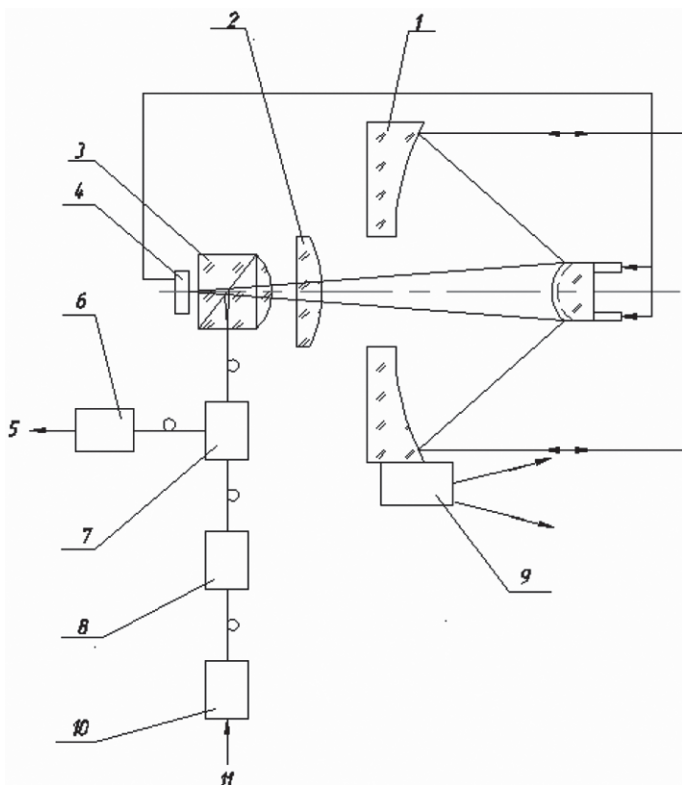
$$P_0 = P_\Phi \frac{\alpha^2 L^2 M}{D^2 \tau_{\text{прд}} \tau_{\text{прм}} \tau_M K_3} = 33 \text{ Вт.}$$

Такая мощность обеспечивается современными ВОУ.

Технический облик аппаратуры бортового терминала. Технический облик такой аппаратуры будет опираться на общие принципы разработки и проектирования аппаратуры межспутниковых оптических линий связи (МОЛС) [1]. На рисунке представлена предложенная оптическая схема бортовой аппаратуры.

Основные параметры оптической схемы бортовой аппаратуры МОЛС:

длина волны излучения информационного канала 1,06 мкм; мощность оптического излучения информационного канала на выходе антенны 27 Вт; выход (вход) источника (приемника) излучения информационного канала — одномодовое оптическое волокно; протокол передачи (приема) данных — полудуплекс (“пинг-понг”), скорость — 1 Гбит/с; главная оптическая система — фокусирующий телескоп типа Кассегрена с диаметром главного зеркала



Оптическая схема бортовой аппаратуры:

1 — зеркало антенны; 2 — цилиндрическая линза; 3 — светоделитель; 4 — ФПЗС; 5 — принятая информация; 6 — фотоприемник; 7 — направленный ответвитель; 8 — волоконно-оптический усилитель; 9 — маяк с антенной; 10 — полупроводниковый лазер; 11 — передаваемая информация

250 мм, фокусное расстояние 1000 мм; система точного наведения — угловая, с продольной подстройкой контррефлектора телескопа, управляемого тремя пьезоприводами; система предварительного наведения — по программе, передаваемой с Земли перед вхождением в связь.

Вхождение в связь — по излучению маяка, засвечивающего всю зону ошибки программного наведения, длина волны маяка 0,8 мкм. Пеленгация сигнала маяка осуществляется с помощью фотодиодной ПЗС-матрицы, установленной в фокусе телескопа.

Дополнительные элементы: светоделительный кубик, разделяющий информационные сигналы (1,06 мкм) и сигналы маяка корреспондента (0,8 мкм); корректирующая линза, наклеенная на светоделительный кубик с радиусом кривизны, равным расстоянию до фокуса телескопа; корректирующая цилиндрическая линза с приводом вращения до 90° , обеспечивающая эллиптичность диаграммы антенны и поворот большой оси сечения диаграммы; малогабаритная антенна маяка с излучателем на мощном полупроводниковом многомодовом лазере; световолоконный направленный ответвитель, направляющий принятый сигнал в фотодетектор.

Оптическая система работает следующим образом. Излучение информационного сигнала от маломощного модулированного источника поступает в оптоволоконный усилитель и далее вводится в волокно. Такой световод имеет физический контакт со светоделительным кубиком. Показатель преломления данного оптического элемента выбран 1,7. Оптический сигнал с длиной волны 1,06 мкм поступает в светоделительный кубик, поворачивается на 90° и выходит через сферическую поверхность перпендикулярно к ней. Проходя через цилиндрическую линзу излучение приобретает расширение по одной оси с необходимым разворотом и поступает в телескоп. На выходе телескопа формируется пучок эллиптического сечения с определенной заданной расходимостью по двум осям. Принимаемый информационный сигнал от корреспондента на длине волны 1,06 мкм поворачивается в кубике на 90° и фокусируется на торце оптического волокна и далее поступает через направленный ответвитель на информационный фотоприемник. Излучение маяка корреспондента на длине волны 0,8 мкм проходит через светоделительный кубик и фокусируется на кристалле ПЗС-матрицы. Расположение источника и объекта в точке двойного фокуса сферического зеркала (в центре радиуса кривизны) сводит к минимуму абберрации системы при высокой светосиле.

Следует отметить, что ПЗС-матрица имеет воздушный зазор со светоделительным кубиком, поэтому для него фокусное расстояние системы равно примерно 600 мм. При размерах матрицы $3,8 \times 3,0$ мм (стандартные матрицы 640×480 с размером пикселя 6 мкм), угол зрения системы наведения составляет $0,37^\circ \times 0,3^\circ$.

Подвижной контррефлектор позволяет осуществлять прецизионное слежение за маяком корреспондента в пределах точности привода опорно-поворотного устройства и отработать все температурные и барические проблемы изменения фокуса телескопической системы. В результате предло-

женного существенно упрощается оптическая система бортовой аппаратуры, что дает уменьшение массы аппаратуры в 2–3 раза.

Выводы. Показано, что при использовании в бортовой аппаратуре межспутниковых оптических линий связи современных волоконных усилителей возможно существенно упростить ее. Предложенная авторами новая концепция построения бортовой аппаратуры на основе мощных ВОУ позволит уменьшить массу и габаритные размеры в 2–3 раза, что принципиально важно для космических изделий.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. K a t z m a n M. Editor. Laser Satellite Communications, Englewood Cliffs, NJ: Prentice Hall, 1987.
2. W i l l i a m K. P r a t t. Laser Communication Systems. JOHN WILEY & SONGS, Inc. New York. 1970.
3. Б о р т о в о й унифицированный терминал межспутниковой лазерной системы передачи информации // ИБПА 461249.008 ПЗ. – М.: ФГУП НИИППИ, 2001.
4. К р ю к о в а И. В., Ч у к о в с к и й Н. Н. Проблемы создания аппаратуры для межспутниковых и атмосферных оптических линий связи // Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. “Приборостроение”. – 2007. – № 1 (66). – С. 9–23.
5. В а с и л ь е в Ю. А., К а з а к о в ц е в А. Ф., К о л и н ь к о В. И., Ч у к о в с к и й Н. Н. Концепция построения оптико-механической системы моноантенного терминала межспутниковой оптической линии связи // Сб. науч. тр. XIV Международной науч.-технич. конф. “Лазеры в науке и медицине”. – М., 2003. – С. 204–213.
6. N i e l s e n T. T., O p p e n h a e u s e r G., L a u r e n t, and P l a n c h e. In-orbit test. Results of the optical Intersatellite link, SILEX. A milestone in satellite communication / 53rd International Astronautical Congress, IAC -02 –M, 2.01, Huston, Oct. 2002.

Статья поступила в редакцию 27.11.2007

Сергей Евгеньевич Широбакин родился в 1953 г., окончил в 1976 г. МГУ им. М.В. Ломоносова. Канд. техн. наук, научный консультант ООО “Мостком”. Автор более 30 публикаций в области разработки лазеров, лазерных систем видеонаблюдения и связи для условий наземного, авиационного и космического базирования.

Ирина Васильевна Крюкова родилась в 1935 г., окончила Ленинградский государственный университет. Д-р физ.-мат. наук, профессор, ведущий научный сотрудник сектора спутниковой оптической связи НИИ РЛ МГТУ им. Н.Э. Баумана. Автор более 200 работ в области полупроводниковых лазерных приборов.

Николай Николаевич Чуковский родился в 1933 г., окончил МЭИ. Начальник сектора спутниковой оптической связи НИИ РЛ МГТУ им. Н.Э. Баумана. Автор около 60 научных работ в области оптической связи в космосе, атмосфере и водной среде.

Георгий Юрьевич Тананаев родился в 1982 г., окончил МГТУ им. Н.Э. Баумана в 2006 г. Инженер сектора спутниковой оптической связи НИИ РЛ МГТУ им. Н.Э. Баумана. Автор трех научных работы в области оптико-электронных систем наблюдения и алгоритмов обработки изображений.