



ОДНОФОТОННЫЕ ДЕТЕКТОРЫ ДЛЯ АТМОСФЕРНЫХ ОПТИЧЕСКИХ ЛИНИЙ СВЯЗИ

Б. Санджинетти, Э. Амри, Ф. Ричоу, IDQ

В системе атмосферной оптической линии связи (АОЛС), работающей в условиях больших оптических потерь, в качестве приемника можно использовать однофотонные детекторы. Если сигнал, поступающий на детектор, ослаблен до уровня одиночного фотона, то его можно будет обнаружить. Рассмотрены параметры, которые важны для бюджета линии связи и помех, присутствующих в системе атмосферных линий связи и представлены однофотонные детекторы.

ВВЕДЕНИЕ

Увеличение спроса на высокоскоростной доступ в Интернет, видеоконференции, потоковое вещание в реальном времени, изображения в режиме реального времени и информационные технологии в целом вызвали давление на существующие спутниковые системы связи, работающие на радиочастотах. Оптические технологии рассматриваются как альтернатива, которая может значительно улучшить работу атмосферных линий связи (например, радиосвязи), благодаря ее передовому состоянию. Действительно, национальные лаборатории и промышленность сосредоточили свои усилия на разработке и коммерциализации оптических систем для атмосферных линий связи (FSO – Free Space Optics или

SINGLE PHOTON DETECTORS USED IN FREE SPACE COMMUNICATION

B.Sanguinetti, E.Amri, F.Richou, IDQ

The article describes the features and technical characteristics of single-photon detectors used for searching low intensity signals in free space optical communication systems

INTRODUCTION

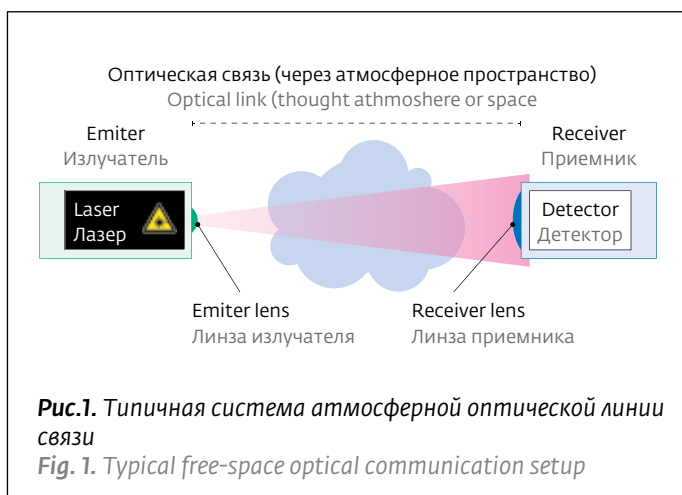
The increase in demand of high speed internet, video conferencing, live streaming, real-time imagery, and information technologies in general, put a strain on the current satellite communication systems based on radio frequencies. Optical technology has been considered as an alternative that can significantly improve the performance of free-space communication systems (such as radio-based communication) due to its advanced state. Indeed, national laboratories and industry have focused their efforts towards the development and commercialization of free-space optical (FSO) systems [1]. Among the advantages offered by FSO systems are: a higher operating frequency than radio systems, providing an increment in the channel capacity or data rate. (The data rates provided by FSO communication can range between 10 Mbps to 10 Gbps [2].) Another advantage is that FSO communication operates at smaller wavelengths than radio communication, resulting in a beam with lower divergence, and hence providing higher precision and intensity for a given transmitted power [2, 3]. Furthermore, FSO systems offer absence of interference between different data links allowing for a large number of channels [2-4]. Optical systems are typically low cost, reliable, have little power demand, and they are available in compact sizes, all desirable qualities for system components. FSO systems are composed of three main elements: emitter (laser), a receiver (detector), and an unobstructed line of sight between the two (communication channel) through which optical signals are sent, see Figure 1. FSO communication systems can be used in scenarios such as satellite communication, military applications, last mile access, intra-campus communication, disaster recovery, etc.



АОЛС – атмосферные оптические линии связи) [1]. К преимуществам, предлагаемым системами АОЛС, относятся: более высокая рабочая частота по сравнению с системами радиосвязи, обеспечивающая увеличение пропускной способности канала или скорости передачи данных. (Скорости передачи данных, предоставляемые АОЛС, могут варьироваться от 10 Мбит/с до 10 Гбит/с [2].) Другим преимуществом является то, что связь АОЛС работает на меньших длинах волн, чем радиосвязь, генерируя луч с меньшей расходимостью и, следовательно, обеспечивая более высокую точность и интенсивность для заданной передаваемой мощности [2, 3].

Кроме того, системы АОЛС обеспечивают отсутствие помех между различными каналами передачи данных, что позволяет использовать большое количество каналов [2-4]. Оптические системы, как правило, недорогие, надежные, имеют небольшой потребляемый ток и все доступны в компактных размерах, а это главные желательные качества для компонентов системы. Системы АОЛС состоят из трех основных элементов: излучателя (лазер), приемника (детектор) и беспрепятственной прямой видимости между ними, то есть канала связи, через который отправляются оптические сигналы (рис. 1). Системы связи АОЛС могут использоваться в таких сценариях, как спутниковая связь, военные приложения, доступ "последней мили", связь внутри административно-производственного корпуса, аварийное восстановление и т.д.

Однако АОЛС-связь также сталкивается с техническими проблемами. Во-первых, для выравнивания по мощности элементов этих систем требуется система наведения и отслеживания между излучателем и приемником [3, 4]. Системы наведения дорогостоящие, и цена систем определяется их точностью и стабильностью. Плохая система наведения приведет к небольшому перекрытию между излучаемым сигналом и эффективной площадью детектора, и соответственно вызовет оптические потери сигнала. Во-вторых, если расстояние между излучателем и приемником слишком велико или климатические условия не благоприятны (например, из-за дождя или тумана), детектор не получит достаточную мощность от входящих оптических сигналов. В этом случае связь будет затруднена большими оптическими потерями в канале связи. Безусловно, одной из основных проблем, с которыми сталкивается АОЛС-связь,



FSO communication, however, also faces technical challenges. First, these systems require a pointing and tracking system between emitter and receiver for alignment purposes [3, 4]. Pointing systems are expensive and the price is driven by its pointing accuracy and stability. A poor pointing system will cause a small overlap between the signal emitted and the effective detector area, translating into optical loss. Second, if the distance between emitter and receiver is too long or if climate conditions are not favorable (for example, due to rain or fog) the detector will not receive enough power from the incoming optical signals. In this case the communication will be impeded by the large optical loss in the communication channel. Certainly, one of the main challenges that FSO communication faces is its feasibility dependence on weather conditions, which determine the optical loss of the communication channel. The possibility to have an FSO communication system that is capable of operating in a low power regime (or equivalently, in a high optical loss regime) is highly desired. In particular, such FSO system would be more robust against limitations due to weather conditions. Alternatively, there exist communication systems that are, in general, benefited of a low optical power operation. This is because a low power operation allows adding a stealthiness factor to the communication that can be used to protect it by hindering the interception of optical signals. An FSO system that operates in a high optical loss regime is possible with the use of single photon detectors (SPDs) at the receiver. Using SPDs the signal arriving at the detector can be attenuated to the single photon level, and the detection will still be possible.



является ее зависимость от погодных условий, которая определяет оптические потери канала связи. Очень желательна возможность создать систему АОЛС-связи, которая способна работать в режиме низкой мощности (или, аналогично, в режиме с высокими оптическими потерями). В частности, такая система АОЛС будет более устойчива к ограничениям из-за погодных условий. В качестве альтернативы существуют системы связи, которые, как правило, выигрывают на фоне имеющихся проблем оптических линий, связанных с низкой мощностью. В их основе лежит тот факт, что операция с малой потребляемой мощностью позволяет добавить коэффициент скрытности в коммуникацию, которая может быть использована для ее защиты, препятствуя перехвату оптических сигналов. Работа системы АОЛС в режиме больших оптических потерь возможна только с использованием однофотонных детекторов (ОФД) в качестве приемника. Если сигнал, поступающий на детектор, ослаблен до уровня одиночного фотона, то его все еще возможно обнаружить, используя ОФД.

БЮДЖЕТ ЛИНИИ СВЯЗИ И ПОМЕХИ

Любая система связи требует бюджета линии связи и оценки помех в системе. В этом разделе мы представим параметры, которые важны для бюджета линии связи и помех, присутствующего в системе АОЛС. В зависимости от приложения канал связи реализуется через атмосферу или сочетание атмосферы и пространства. Когда сигнал передается по каналу связи, он ослабляется из-за различных физических эффектов, приводящих к оптическим потерям. Затухание происходит независимо от того, установлен ли канал в пространстве или в атмосфере, хотя существуют и иные различные причины. В пространстве затухание обусловлено дивергенцией. В атмосфере затухание обусловлено поглощением и рассеянием, которое, в свою очередь, зависит от длины волны и среды передачи (дождя, тумана и т.д.). Помехи, присутствующие в системе АОЛС, могут быть вызваны внутренними помехами компонентов системы или фоновым излучением. Фоновые помехи будут зависеть от местоположения и ориентации системы АОЛС, а также от сезонного и суточного времени работы. В следующих разделах дается краткое описание влияния на производительность системы связи АОЛС каждого из этих параметров.

LINK BUDGET AND NOISE

Any communication system requires a link budget and an estimation of noise in the system. In this section we will introduce the parameters of importance for the link budget and the noise present in an FSO system. Depending on the application, the communication channel is implemented through the atmosphere or through a combination of atmosphere and space. When a signal is transmitted through the communication channel it is attenuated due to different physical effects resulting in optical loss. The attenuation occurs regardless if the channel is established in space or atmosphere, albeit due to different causes. In space, the attenuation is due to divergence. In the atmosphere the attenuation is due to absorption and scattering, which in turn depends on the wavelength and the medium of transmission (rain, fog, etc). The noise present in an FSO system can be due to intrinsic noise of the components of the system or due to background radiation. The background noise will depend on the location and orientation of the FSO system, as well as the time of operation. In the following paragraphs we give a brief description of how each of these parameters impact the performance of an FSO communication system.

Wavelength

The choice of wavelength of the laser at the emitter depends mainly on three factors: the absorption (or losses) through the communication channel, the technology available to modulate the laser, and the technology available to detect the optical signals. When a signal transmits through space there is no absorption, vacuum does not impose any restrictions on the choice of wavelength. However, in the atmosphere, photons are absorbed and diffused by molecules, causing optical loss. Different wavelengths experience different absorption but a transmission window exists for visible light (400nm-800nm) and in the near infrared (around 1550 nm), making these wavelengths good candidates for FSO communication. It has been shown that the transmittance for 1550 nm through the atmosphere is higher than for visible light, see Figure 2, making this wavelength a good candidate for FSO communication.

Another wavelength dependent effect that causes loss is scattering. In the visible and ultraviolet range air molecules and haze cause Rayleigh scattering. At near-infrared wavelengths aerosol particles, such as fog and haze, will cause Mie scattering. As FSO communication depends highly on weather conditions, it is necessary to find out if there are

Длина волны

Выбор длины волны лазера на излучателе зависит главным образом от трех факторов: поглощения (или потерь) по каналу связи, технологии, доступной для модуляции лазера, и технологии, доступной для обнаружения оптических сигналов. Когда сигнал проходит через пространство, то поглощение отсутствует, поэтому вакуум не накладывает никаких ограничений на выбор длины волны. Однако в атмосфере фотоны поглощаются и рассеиваются молекулами, вызывая оптические потери. Различные длины волн подвергаются различному поглощению, но есть окно прозрачности для передачи на длинах волн видимого света (400–800 нм) и в ближнем ИК-диапазоне (около 1550 нм), что позволяет выбирать эти волны в качестве наиболее подходящих для АОЛС-связи. Известно, что коэффициент пропускания для длины волны 1550 нм в атмосфере выше, чем для видимого света (рис. 2), и это делает данную длину волны подходящей для АОЛС-связи.

Другим фактором, зависящим от длины волны, который вызывает потерю, является рассеяние. В видимом и УФ-диапазоне молекулы воздуха и аэрозольные частицы вызывают релевское рассеяние. На ближнем ИК-диапазоне аэрозольные частицы, такие как туман и дым, будут вызывать рассеяние Ми. Поскольку АОЛС-связь сильно зависит от погодных условий, необходимо выяснить, есть ли какие-либо преимущества в использовании видимых или ближних инфракрасных волн в неидеальных условиях.

Для легкого тумана ослабление, обусловленное рассеянием, меньше для 1550 нм, чем для более коротких длин волн, таких как 850 нм [2]. Это делает волны длиной 1550 нм более подходящими для реализаций АОЛС в этих условиях.

Фактически, ИК-длины волн обеспечивают два дополнительных преимущества перед видимым светом в использовании для АОЛС-связи. Во-первых, выбор длины волны должен соответствовать международным требованиям безопасности относительно допустимой выходной мощности лазера [5]. Желательна наивысшая возможная мощность, поскольку это увеличивает вероятность передачи сигнала в канале связи. Для более высокой вероятности передачи можно достичь более высокого расстояния связи. Аналогично, если расстояние между излучателем и приемником фиксировано, увеличение мощности излучения лазера увеличивает отношение сигнала к шуму. Согласно международным

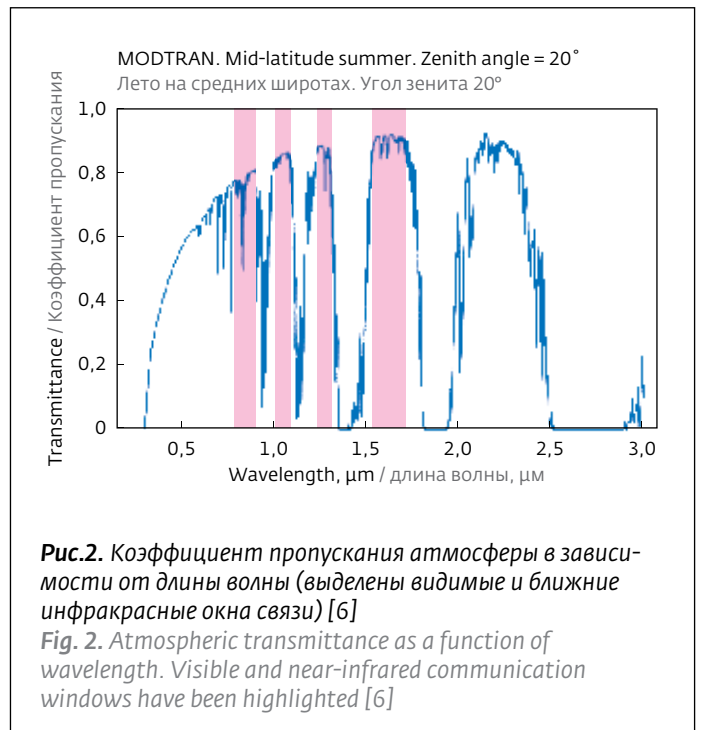


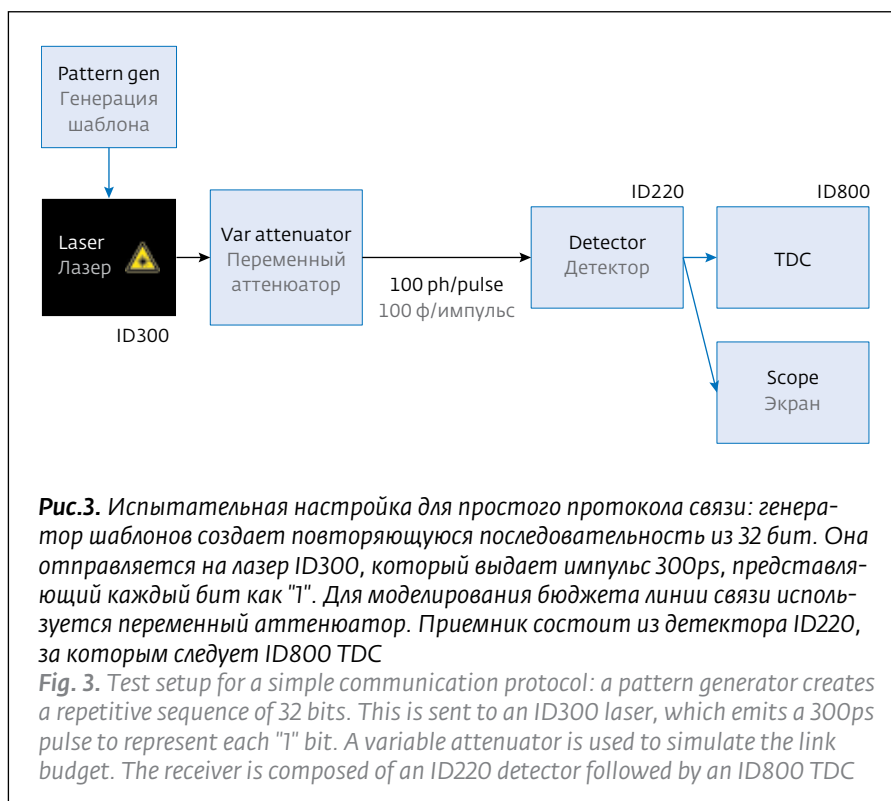
Рис.2. Коэффициент пропускания атмосферы в зависимости от длины волны (выделены видимые и ближние инфракрасные окна связи) [6]

Fig. 2. Atmospheric transmittance as a function of wavelength. Visible and near-infrared communication windows have been highlighted [6]

any advantages to using visible or near-infrared wavelengths under non-ideal conditions.

For light fog, the attenuation due to scattering is less for 1550 nm than for shorter wavelengths such as 850 nm [2]. This makes 1550 nm more suitable for FSO implementations under these conditions.

In fact, near infrared wavelengths offer an additional two advantages over visible light in FSO communication. First, the choice of wavelength should comply with international safety specifications regarding the allowed output power of the laser [5]. The highest possible power is desired because it increases the probability of transmission of the signal in the communication channel. For a higher probability of transmission it is possible to achieve a higher distance of communication. Alternatively, if the distance between emitter and receiver is fixed, increasing the emission power of the laser increases the signal to noise ratio. According to the international standards for laser safety, a Class 1 laser is safe under all conditions of normal use and a Class 1M laser is safe for all conditions of use except when passed through magnifying optics such as microscopes and telescopes. For Class 1 lasers the maximum allowed CW output power is 10 mW for 1550 nm and about 1 mW for 760 nm [5, 6], benefiting the infrared wavelength. The second advantage of infrared wavelengths is in relation to infrastructure. Existing communication networks based on optical fibre operate for the near infrared wavelengths,



стандартам лазерной безопасности, лазер класса 1 безопасен при любых условиях нормального использования, а лазер класса 1M безопасен для любых условий использования, кроме случаев, когда он проходит через увеличительную оптику, например, микроскопы и телескопы. Для лазеров класса 1 максимальная допустимая выходная мощность непрерывного излучения составляет 10 мВт для 1550 нм и около 1 мВт для 760 нм [5, 6], что благоприятствует инфракрасной длине волны. Второе преимущество инфракрасных длин волн связано с инфраструктурой. Существующие сети связи, основанные на оптическом волокне, работают для длин волн ближнего инфракрасного диапазона, в частности для 1310 нм и 1550 нм. Обширная сеть связи состоит из волоконных линий, которые распространяются по всему миру, соединяя разные страны. Выбор для работы с сигналами на длине волны 1550 нм является естественным выбором для установления интерфейса между связью АОЛС и существующими системами связи на основе оптоволоконка.

Расходимость

Другой источник потерь в системе связи АОЛС – расходимость луча. Это явление ведет к росту размера пятна луча с увеличением рас-

specifically for 1310 nm and 1550 nm. The vast communication network consists of fibre links that extend throughout the world, interconnecting different countries. Choosing to work with signals at 1550 nm is the natural choice to establish an interface between FSO communication and existing communication systems based on optical fibre.

Divergence

Another source of loss in an FSO communication system is divergence. Divergence causes an increase in the size of the beam spot as a function of the distance from the aperture where the beam originates. The divergence of the beam increases with wavelength, and it decreases as the emitter lens increases in size. As an example, if only divergence is considered, a beam emitted in space at 1550

nm with a lens aperture of 0.1 m will expand to 11 m in diameter after a transmission distance of 600 km. Optical loss will be caused if the diameter of the telescope at the receiver does not match the diameter of the beam due to signal clipping, see table 1. The assumption of a large telescope that matches the beam diameter after its propagation through a long distance, however, is unrealistic. Unfortunately, divergence is not the only source of beam spreading, atmospheric turbulence also causes beam spreading, adding to the optical loss of the channel.

Pointing Error

If emitter and receiver move relatively to each other, for example in the scenario of a satellite moving with respect to a ground station, the FSO system must also have alignment capabilities. This is achieved with a pointing, acquisition, and tracking (PAT) system. A PAT system employs two optical beams to perform the alignment needed in the FSO system. The inherent pointing error of a PAT system will introduce optical loss in the FSO system. While divergence leads to more optical loss at longer wavelengths, it will also reduce the loss due to pointing error. This is because for a larger wavelength the divergence will cause a larger beam size at the ground, compensating for the poor pointing precision. One can see in table 1 the respective values of optical loss due to divergence



Таблица 1. Бюджет линии связи для спутника LEO, находящегося на 600 км орбите и с излучателем $\varnothing=0,1$ м

Table 1. Link budget for a LEO satellite placed at a 600 km orbit and with an emitter of $\varnothing=0.1$ m

Параметр Parameters	Потери при 1550 нм Loss at 1550 nm	Потери при 760 нм Loss at 760 nm
Коэффициент передачи Transmittance	3	4
Расхождение Divergence	27	21
Ошибка наведения (10 μ рад) Pointing error (10 μ rad)	5	10
Эффективность сбора и обнаружения Collection & detection efficiency	10	5
Общие потери Total loss	45	40

and pointing error for two different wavelengths. The value of 10 μ rad for pointing error that we used in this example is challenging however feasible in a micro satellite [8]. A six unit CubeSat could be equipped with a pointing and tracking system with pointing errors of ± 90 μ rad [9], this would lead to an optical loss of -29 dB and -35 dB for 1550 nm and 760 nm respectively.

Atmospheric turbulence

One more factor that contributes to loss in a FSO communication system is atmospheric turbulence. Turbulence is due to local temperature variations and it causes fluctuations of the index of refraction in the communication channel. Atmospheric turbulence translates into intensity fluctuations; beam spread and beam wander [8]. Of these effects, beam spread and beam wander are sources of loss. Beam wander can effectively be treated as beam spread as it causes spatial beam fluctuations. Intensity fluctuations are the result of the propagation of the signal through the atmosphere and are known as scintillation. These fluctuations can be spatial (speckle) or temporal (twinkle). Establishing a communication channel with a satellite can be done in two different configurations. The signal can be emitted from the

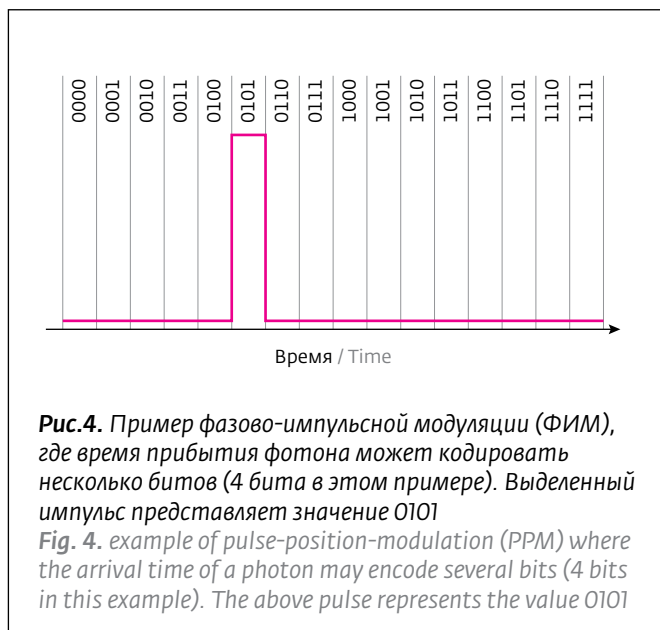


Рис.4. Пример фазово-импульсной модуляции (ФИМ), где время прибытия фотона может кодировать несколько битов (4 бита в этом примере). Выделенный импульс представляет значение 0101

Fig. 4. example of pulse-position-modulation (PPM) where the arrival time of a photon may encode several bits (4 bits in this example). The above pulse represents the value 0101

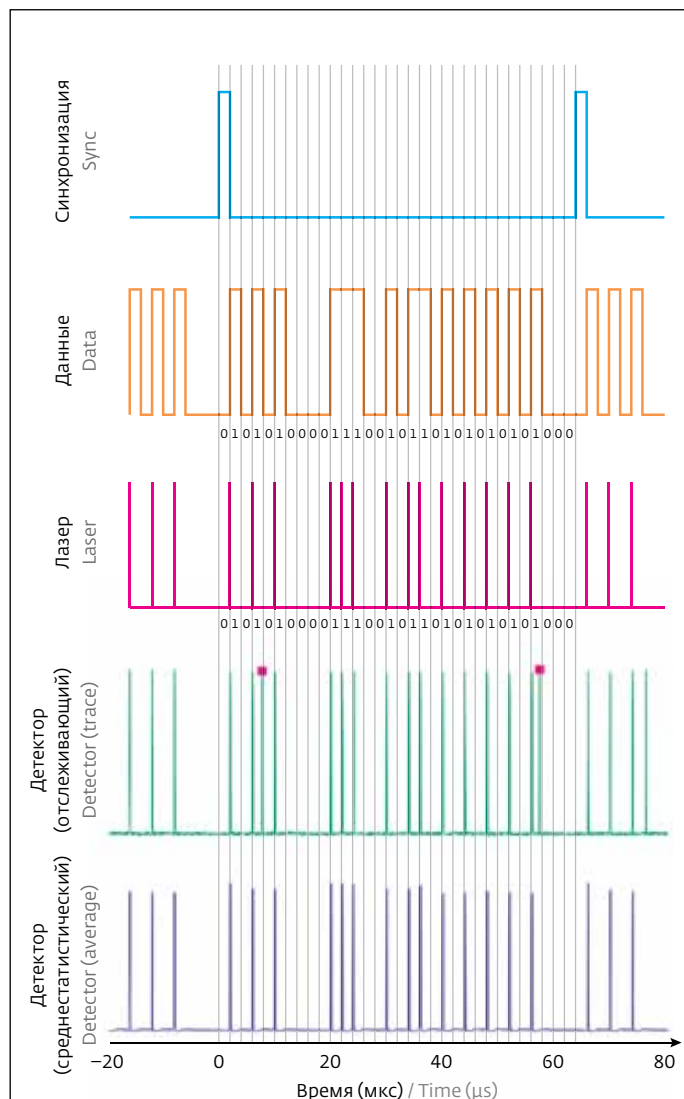


Рис.5. Простой эксперимент связи на однофотонном уровне. На траектории отслеживающего детектора отображаются две ошибки (отмеченные красным квадратом), которые можно устранить, поскольку они не совпадают с ожидаемым фотоном

Fig. 5. Simple communication experiment at the single-photon level. The detector trace displays two errors (labeled by a red square) that can be eliminated as they do not align with the expected photon

стояния от апертуры, из которой исходит луч. Расходимость луча увеличивается с длиной волны и уменьшается с ростом размера линзы излучателя. В качестве примера, если учитывать только расходимость, рассмотрим случай, когда луч выходит в пространство на длине волны 1550 нм через линзу с апертурой 0,1 м. Луч будет расширяться до 11 м в диаметре при дальности передачи 600 км. Оптические потери будут возникать, если диаметр телескопа на приемнике не будет соответствовать диаметру луча из-за обрыва сигнала (таблицу 1). Предложение об использовании большого телескопа, приемное зеркало которого соответствовало бы диаметру луча после его распространения на большое расстояние, выглядит нереалистично. К сожалению, расхождение не является единственным источником расходимости луча. Атмосферная турбулентность также вызывает расходимость луча, увеличивая оптическую потерю канала.

Ошибка наведения

Если излучатель и приемник движутся относительно друг к другу, например, в сценарии движения спутника относительно наземной станции, система АОЛС также должна иметь возможности выравнивания. Это достигается с помощью системы наведения, сбора и отслеживания (НСО). Система НСО использует два оптических луча для выполнения выравнивания, необходимого в системе АОЛС. Внутренняя ошибка наведения системы НСО приведет к оптическим потерям в системе АОЛС. В то время как расходи-

satellite to the ground station (downlink) or from the ground station to the satellite (uplink). An uplink has the advantage of allowing a larger transmitter system and gives opportunity for upgrades after the launch of the platform. However, in an uplink the dominant factor for loss is beam spreading due to turbulence [2, 8]. This is because the effect of atmospheric turbulence occurs closer to Earth, in the first 20 km of the atmosphere. In contrast a downlink has the advantage that it is much less sensitive to



мость приводит к росту оптических потерь при использовании более длинных волн, ошибка наведения также увеличивают потери. Это объясняется тем, что для большей длины волны расхождение приведет к увеличению размера луча на земле, компенсируя плохую точность наведения. В табл.1 представлены соответствующие значения оптических потерь из-за расхождения и ошибки наведения для двух разных длин волн. Значение $10 \mu\text{rad}$ для ошибки наведения, которое мы использовали в этом примере, является сложным, хотя возможным на микроспутнике [8]. Шестимодульный спутник CubeSat может быть оснащен системой наведения и слежения с ошибками наведения $\pm 90 \mu\text{rad}$ [9], это приведет к оптическим потерям -29 dB и -35 dB для 1550 nm и 760 nm , соответственно.

Атмосферная турбулентность

Еще одним фактором, который ведет к потерям в системе АОЛС-связи, является атмосферная турбулентность. Турбулентность обусловлена локальными колебаниями температуры и вызывает флуктуации показателя преломления в канале связи. Атмосферная турбулент-

ность приводит к росту оптических потерь при использовании более длинных волн, ошибка наведения также увеличивают потери. Это объясняется тем, что для большей длины волны расхождение приведет к увеличению размера луча на земле, компенсируя плохую точность наведения. В табл.1 представлены соответствующие значения оптических потерь из-за расхождения и ошибки наведения для двух разных длин волн. Значение $10 \mu\text{rad}$ для ошибки наведения, которое мы использовали в этом примере, является сложным, хотя возможным на микроспутнике [8]. Шестимодульный спутник CubeSat может быть оснащен системой наведения и слежения с ошибками наведения $\pm 90 \mu\text{rad}$ [9], это приведет к оптическим потерям -29 dB и -35 dB для 1550 nm и 760 nm , соответственно.

beam spreading due to atmospheric turbulence. For a downlink the dominant factor for loss is divergence. For this reason, there is an advantage to placing the emitter at the satellite, rather than at the ground station. This configuration is also optimal to place a large receiver telescope on a ground station to reduce losses due to signal clipping. In addition to optical loss the atmospheric turbulence will cause temporal dispersion of the optical pulses, the time jitter across 600 km in a satellite pass has been estimated to be on the order of 50 ps [8,10]. In the following table we present the link budget for a satellite located in a low earth orbit, at an altitude of 600 km . The emitter aperture is assumed to be 0.1 m and the pointing error of the system is assumed to be $10 \mu\text{rad}$. The detection efficiency is assumed to be 20% for the detectors at 1550 nm , and 70% for the 760 nm wavelength. We assumed a collection efficiency of the optical system at the receiver of 50% .

Noise

Noise imposes a limitation on the signal to noise ratio that can be achieved. The two main sources of noise in an FSO system using single photon detectors are intrinsic dark



Таблица 2. Детекторы ID для атмосферных оптических линий связи

Table 2. Parameters of the models ID

	ID230	ID220	ID210	ID280
Соединение Coupling	Многомодовое волокно 100 μm в диаметре Multimode fiber 100 μm diameter	Многомодовое волокно 100 μm в диаметре Multimode fiber 100 μm diameter	Многомодовое волокно 100 μm в диаметре Multimode fiber 100 μm diameter	Одномодовое волокно 9 μm в диаметре Singlemode fiber 9 μm diameter
Режим работы Operation	Автономный Free-running	Автономный Free-running	Стробируемый Gated	Автономный Free-running
Эффективность обнаружения Detection efficiency	>25%	>20%	>25%	>70%
Темновая скорость счета Dark count rate	<25/s	<1000/s	<10000/s	100/s
Максимальная скорость счета Maximum count rate	500 kHz	1 MHz	5 MHz	15 MHz
Временное разрешение Timing resolution	80 ps	160 ps	250 ps	70 ps

ность выражается в колебаниях интенсивности; в рассеянии луча и флуктуациях оптической оси луча [8]. Эти эффекты рассеяния и флуктуации луча являются источниками потерь. Флуктуации в виде блуждания луча можно эффективно рассматривать как распространение луча, поскольку оно вызывает пространственные колебания луча. Флуктуации интенсивности являются результатом распространения сигнала в атмосфере и известны как сцинтилляция. Такие флуктуации могут быть пространственными (спекл) или временными (мерцание). Установление канала связи со спутником может выполняться в двух разных конфигурациях. Сигнал может излучаться со спутника на наземную станцию (нисходящий канал связи) или от наземной станции на спутник (восходящий канал связи). Преимущество восходящего канала связи заключается в том, что он позволяет использовать более крупную систему передатчиков и дает возможность для модернизации после запуска платформы. Однако в восходящем канале доминирующим фактором для потерь является рассеяние пучка из-за турбулентности [2, 8]. Это объясняется тем, что вли-

counts and background radiation. The amount of false counts due to background light will depend on the wavelength that is chosen for the communication, and the location of the ground terminal (urban or rural environment). Nevertheless, the effects of background light can be minimized if temporal and spectral filters are used in the system. The use of optical fibre coupled with the detector minimizes the possibility of having a detection originating from stray photons. Temporal filtering can be performed by synchronizing the opening (activation) of the detectors with the arrival of a signal. A specific implementation of temporal filtering is easily achieved through the use of window gates or via autocorrelation (with an ID800) and a computer. Using this technique one can achieve, for example, for a repetition frequency of 1 MHz, and a realistic detection window of 100 ps, a signal to noise ratio of 40dB. Finally, a spectral filter will allow reducing the instance of false counts. An ordinary filter of 1 nm can be used to select the adequate spectral window chosen for communication. An additional argument for choosing near-



яние турбулентности атмосферы происходит ближе к Земле, в нижних слоях атмосферы, в ее первых 20 км. Напротив, нисходящий канал связи имеет то преимущество, что он намного менее чувствителен к распространению луча из-за атмосферной турбулентности. Для нисходящей линии связи доминирующим фактором оптических потерь является расходимость. По этой причине существенное преимущество имеет размещения излучателя на спутнике, а не на наземной станции. Эта конфигурация также оптимальна для размещения большого приемного телескопа на наземной станции для уменьшения потерь из-за обрыва сигнала. В дополнение к оптическим потерям атмосферная турбулентность вызовет временную дисперсию оптических импульсов, временной джиттер на 600 км спутниковой траектории оценивается примерно в 50 пс [8,10]. В табл.1 представлен бюджет ссылок для спутника, расположенного на низкой околоземной орбите, на высоте 600 км. Предполагается, что апертура излучателя составляет 0,1 м, а погрешность позиционирования системы – 10 мрад. Предполагается, что эффективность обнаружения составляет 20% для детекторов при длине волны 1550 нм и 70% для длины волны 760 нм. Мы предполагаем эффективность сбора оптической системы на приемнике 50%.

Шум

Шум накладывает ограничение на отношение сигнал-шум, которое может быть достигнуто. Двумя основными источниками шума в системе АОЛС, использующей однофотонные детекторы, являются собственный темновой ток, скорость счета и фоновое излучение. Количество ложных отсчетов из-за фонового освещения будет зависеть от длины волны, выбран-

infrared wavelengths is the effects of scattering. False counts that are due to scattering will be less likely for near infrared wavelengths than visible wavelengths because the scattering scales as λ^{-4} .

SINGLE PHOTON DETECTORS

Single photon detectors (SPDs) are a good solution to the detection of low intensity signals in FSO communication systems. As their name states, SPDs are capable of detecting the presence of a single photon with extreme timing accuracy (down to 50ps). This high timing accuracy helps to distinguish synchronous signals from noise, which has a random time of arrival. Alternatively, several bits may be encoded on a single photon, for example using pulse-position modulation (PPM), it is possible to encode $\log_2(T/\tau)$ bits onto a single photon, if it is sent during time T and the detector has resolution τ . E.g. 14 bits may be encoded in a single photon if one is sent every $1.6\mu\text{s}$ and the detector has a 100ps resolution. In this example, 8Mbps may be sent with approximately 1pW (-90 dBm) of receiver power (using a 10% detector efficiency, a wavelength of 1550nm).

A simpler encoding consists of sending a laser pulse to represent a "1" and sending no laser pulse to represent a "0". For example, one may send a bit every $2\mu\text{s}$, achieving a bit rate of 500kbps. As bits may be sent synchronously, any detection outside of the expected time-slot can be labelled as noise, eliminating errors due to noise.

We performed a test of this type of encoding using the setup shown in Figure 3. Results can be seen in Figure 4. Depending on the exact protocol employed, noise conditions and link budget, the choice of optimal detector may be different. The most important decision to make is between a free-running or gated detector.



ной для связи, и местоположения наземного терминала (городская или сельская среда). Тем не менее, фоновые эффекты могут быть минимизированы, если в системе используются временные и спектральные фильтры. Использование оптического волокна в сочетании с детектором сводит к минимуму возможность обнаружения, происходящего от рассеянных фотонов. Временная фильтрация может быть выполнена путем синхронизации открытия (активации) детекторов с приходом сигнала. Конкретная реализация временной фильтрации легко достигается за счет использования оконных фильтров или методов автокорреляции (с ID800) при обработке сигналов на компьютере. Используя этот метод, можно добиться, например, частоты повторения 1 МГц, ширины импульса 100 пс, отношения сигнал-шум 40 дБ. Наконец, спектральный фильтр позволит уменьшить количество ложных отсчетов. Обычный фильтр на 1 нм может быть использован для выбора адекватного спектрального окна, выбранного для связи. Дополнительным аргументом в пользу выбора длин волн ближнего инфракрасного диапазона является эффект рассеяния. Ложные подсчеты, обусловленные рассеянием, будут менее вероятными для волн ближнего инфракрасного диапазона, чем видимые длины волн, поскольку вероятность рассеяния растет пропорционально величине λ^{-4} .

ОДНОФОТОННЫЕ ДЕТЕКТОРЫ

Однофотонные детекторы (ОФД) являются хорошим решением задачи обнаружения сигналов низкой интенсивности в системах АОЛС-связи. Исходя из их названия, ОФД способны обнаруживать присутствие одного фотона с предельной точностью синхронизации (до 50 пс). Эта высокая точность синхронизации помогает отличить синхронные сигналы от шума, который имеет случайное время прибытия. Альтернативно, несколько битов могут быть закодированы на одном фотоне, например, с использованием фазово-импульсной модуляции (ФИМ), можно кодировать биты на один фотон, если он отправляется во время, и детектор имеет разрешение τ . Например, 14 битов могут быть закодированы в одном фотоне, если один отправляется каждые 1,6 μ s, а детектор имеет разрешение 100 пс. В этом примере (рис.5) 8 Мбит/с могут быть отправлены с мощностью приблизительно 1 пВт (-90 дБм) мощности приемника (исполь-

Free-running detectors

This type of detector is active all the time, as soon as a photon is detected, however, the detector discharges and remains off for a certain time (typically 1 μ s-10 μ s). This effect limits the maximum number of counts that the detector may have (e.g. to 1Mcps). If there is a strong environmental noise component (e.g. stray light), several of the possible counts will be taken up by noise instead of signal. Although noise can be eliminated in postprocessing, e.g. by looking at the photon arrival time, having a dominant noise component will limit the maximum number of signal counts that can be measured. The advantage of free-running detectors is that all synchronization can be done in postprocessing, for example using a timestamping unit such as the ID800.

The ID220, ID230, and ID280 are free-running detectors for the infrared spectrum, whereas the ID100 and ID120 are visible free-running detectors.

Gated detectors

Gated detectors may be set to be active or inactive according to an external synchronization signal, and may be set to become active for durations as low as 1ns. Any signal or noise that arrives outside of the gate will not affect the device, which will therefore not be affected by "dead-time". This allows for communication to happen over a noisy channel, where the signal is buried in noise but can be selected by appropriate synchronization of the detectors. Gated detectors, such as the ID210 IR device or the ID110 visible device do have a free-running mode, however their performance in this mode is lower (e.g. higher noise) than that of native free-running devices such as the ID220 or ID230.

Superconducting detectors

Superconducting nanowire single-photon detectors (SNSPDs), such as the ID280, provide high efficiency and fast detection, however their superconducting nature requires them to run at <2.5K, i.e. in a cryostat. These detectors offer high performances but expensive, and may require more support than standard InGaAs devices.

IDQ offers SPDs that work for both visible and near infrared wavelengths. The detectors can operate either in free-running mode or gated mode. SPDs feature low intrinsic noise, allowing a good signal to noise ratio, and hence are good candidates for communication systems. In addition, SPDs provide a timing resolution of 200 ps of the detected signal, this is particularly useful for implementations of communication protocols based on timing information such as the



зование 10% эффективности детектора, длина волны 1550 нм).

Более простое кодирование состоит в отправке лазерного импульса как "1" и отсутствии лазерного импульса как "0". Например, можно отправлять бит каждые 2 μ s, достигая битовой скорости 500 Кбит/с. Поскольку биты могут передаваться синхронно, любое обнаружение за пределами ожидаемого временного интервала может быть помечено как шум, устраняя ошибки из-за шума. Мы провели испытание такого типа кодирования, используя настройку, показанную на рис.3. Результаты можно увидеть на рис.4.

В зависимости от конкретного используемого протокола, условий шума и бюджета линии связи, выбор оптимального детектора может отличаться. Самое важное решение состоит в выборе между автономным или закрытым детектором.

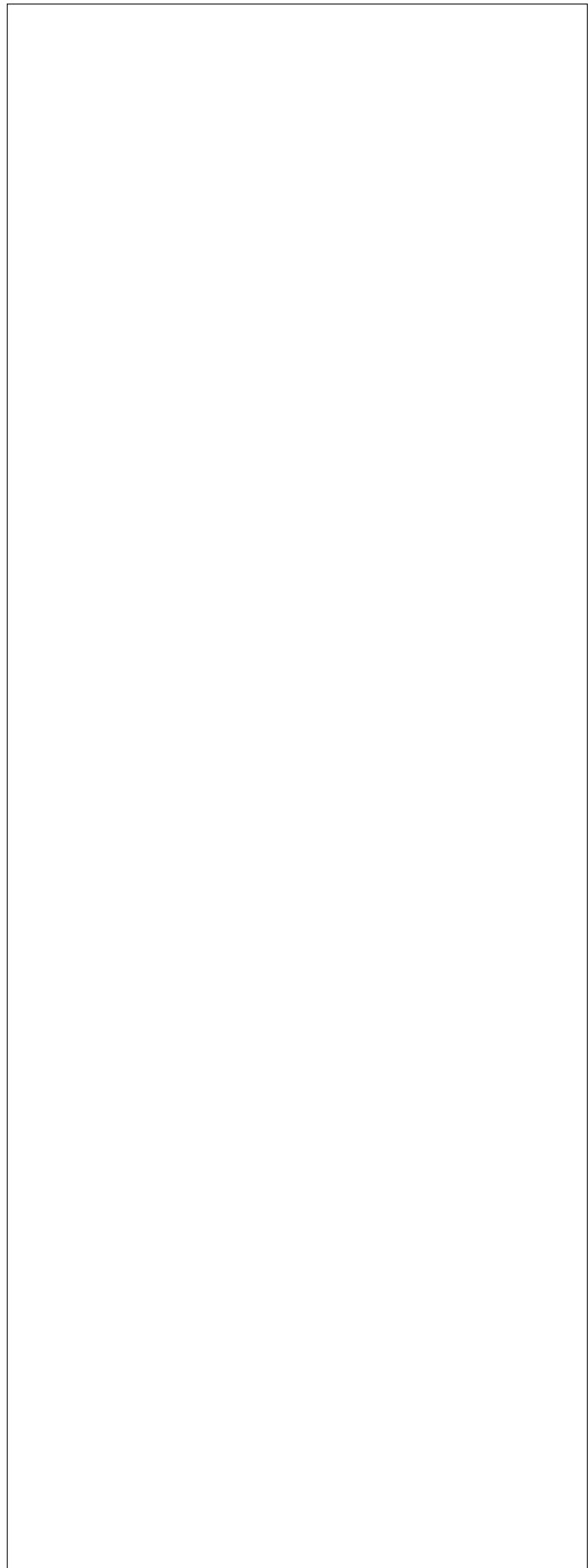
Автономные детекторы

Этот тип детектора активен все время, как только детектируется фотон, однако детектор разряжается и остается выключенным на определенное время (обычно 1 μ s - 10 μ s). Этот эффект ограничивает максимальное количество отсчетов, которое может иметь детектор (например, до 1 МГц/с). Если имеется сильный компонент шумового воздействия (например, рассеянный свет), несколько возможных значений будут учитываться шумом вместо сигнала. Хотя шум может быть устранен при последующей обработке, например, учитывая время прибытия фотонов, наличие доминантной составляющей шума ограничит максимальное количество отсчетов сигналов, которые могут быть измерены. Преимущество автономных детекторов заключается в том, что вся синхронизация может быть выполнена при последующей обработке, например, с использованием модуля отметки времени, такого как ID800.

ID220, ID230 и ID280 являются автономными детекторами для инфракрасного спектра, в то время как ID100 и ID120 являются автономными детекторами видимого света.

Строблируемые детекторы

Строблируемые детекторы могут быть установлены как активные или неактивные в соответствии с внешним сигналом синхронизации, и могут быть установлены в активное состояние в течение периодов, составляющих 1 нс. Любой сигнал





или шум, который поступает за пределы шлюза, не влияет на устройство, поэтому на него не влияет "мертвое время". Это позволяет осуществлять обмен данными по шумному каналу, где сигнал зашумлен, но может быть отобран путем соответствующей синхронизации детекторов. Стробируемые детекторы, такие как ИК-устройство ID210 или устройство видимого света ID110, имеют свободный режим, однако их работа в этом режиме ниже (например, более высокий уровень шума), чем у оригинальных автономных устройств, таких как ID220 или ID230.

Сверхпроводящие детекторы

Сверхпроводящие нанопроволочные однофотонные детекторы (СПНОД), такие как ID280, обеспечивают высокую эффективность и быстрое обнаружение, однако их сверхпроводящий характер требует, чтобы они работали при $< 2,5$ К, то есть в криостате. Эти детекторы обеспечивают высокую производительность, но стоят дорого и могут нуждаться в большем техническом обслуживании, чем стандартные устройства InGaAs.

Компания IDQ предлагает ОФД, который работает как для видимого света, так и для ближней инфракрасной области спектра. Детекторы могут работать как в автономном режиме, так и в стробируемом режиме. ОФД характеризуются низким внутренним шумом, что обеспечивает хорошее соотношение сигнал-шум и, следовательно, является подходящим для систем связи. Кроме того, ОФД обеспечивают временное разрешение 200 пс обнаруженного сигнала, что особенно полезно для реализаций протоколов связи на основе информации синхронизации, такой как протокол фазово-импульсной модуляции. ОФД производства IDQ могут быть соединены с устройствами атмосферных оптических линий связи или соединены через оптическое волокно (одномодовое или многомодовое). Хотя установление связи сигнала в детекторе может быть сложной задачей, такая связь уже была продемонстрирована. В ходе демонстрации проекта "Лунная лазерная связь" было продемонстрировано взаимодействие лазерного излучения от геосинхронного спутника на расстоянии 300 000 км, на ОФД, расположенный на наземной станции. Спутник излучал свет на ближней инфракрасной длине волны. На наземной станции четыре телескопа, каждый диаметром 0,4 м, связали лазерный свет четырьмя многомодовыми волокнами, соединяющимися в однофотонный детектор [11, 12].

pulse-position modulation protocol. IDQ SPDs can be free-space coupled or coupled via an optical fibre (either single mode or multimode). Although the coupling of the signal into the detector can be a challenging task it has already been demonstrated. The project Lunar Laser Communication Demonstration showed the coupling of laser light emitted from a geosynchronous satellite at a distance of 300,000 km into a SPD located at a ground station. The satellite emitted light in the near-infrared wavelength. At the ground station four telescopes, each of 0.4 m in diameter, coupled the laser light into four multimode fibres connecting into the single photon detector [11, 12].

REFERENCES

1. <https://artes.esa.int/news/future-optical-communications-space> https://www.nasa.gov/directorates/heo/scan/engineering/technology/txt_opticalcomm_start.html
2. **H.Kaushal, G.Kaddoum**, "Free Space Optical Communication: Challenges and Mitigation Techniques", arXiv:1506.04836, 2015.
3. **David G.Aviv**, "Laser Space Communications", Artech House, 2006.
4. **B.G.Boone, J.R.Bruzzi, B.E.Kluga, W.P.Millard, K.B.Fielhauer, D.D.Duncan, D.V.Hahn, C.W.Drabenstadt, D.E.Maurer, and Robert S.Bokulic**, "Optical Communications Development for Spacecraft Applications", JOHNS HOPKINS APL TECHNICAL DIGEST, VOLUME 25, NUMBER 4 (2004).
5. "Safety and laser products – Part 1: Equipment classification and requirements", International Electrotechnical Commission, (IEC-60825-1), Ed. 3, 2007.
6. Spectroscopy of Rocks and Minerals, and Principles of Spectroscopy, Roger N.Clark, 1999.
7. https://en.wikipedia.org/wiki/Laser_safety
8. **J.-P. Bourgoïn, E.Meyer-Scott, B.L.Higgins, B.Helou, C.Erven, H.Hübel, B.Kumar, D.Hudson, I. D'Souza, R.Girard, R.Laflamme and T.Jennewein**, "A comprehensive design and performance analysis of low Earth orbit satellite quantum communication", New Journal of Physics, Vol. 15, 069502, 2014.
9. **B.Udrea, M.Nayak, F.Ankersen**, "Analysis of the Pointing Accuracy of a 6U CubeSat Mission for Proximity Operations and Resident Space Object Imaging", 5th International Conference on Spacecraft Formation Flying Missions and Technologies, 2013.
10. **L.C.Sinclair, F.R.Giorgetta, W.C.Swann, E.Baumann, I.Coddington, and N.R.Newbury**, "Optical phase noise from atmospheric fluctuations and its impact on optical time-frequency transfer", Phys. Rev. A, 89:023805, 2014.
11. <http://alumni.jhu.edu/sites/default/files/NASA-LasercomTalk-JHU-Aerospace-Affinity-June-11th-2014.pdf>. Presentation to the JHU Aerospace Affinity Group.
12. **K.E.Wilson, D.Antos, L.C.Roberts Jr., S.Piazzolla, L.P.Clare, A.P.Croonquist**, "Development of the Optical Communication Telescope Laboratory: A Laser communication relay demonstration ground station", Proc. International Conference on Space Optical Systems and Applications (ICSOS), 2012.