

*д. т. н., проф. Денищик Ю.С.
(ГМЦ «Орион» ДонГТУ, г. Алчевск, Украина)*

АНАЛИЗ СОВРЕМЕННОГО СОСТОЯНИЯ ЛАЗЕРНОЙ ЛОКАЦИИ КОСМИЧЕСКИХ ОБЪЕКТОВ И ОПТИМАЛЬНОГО ПОСТРОЕНИЯ ЛЛС

Розглянуті спроби різних колективів фахівців досягнути оптимальної побудови супутникових лазерно-локаційних станцій (ЛЛС). Проаналізований сучасний стан відповідної наукової галузі. Показано, що для оптимізації ЛЛС за важливішими показниками необхідні інші критерії в порівнянні з раніш запропонованими.

Проблема и ее связь с научными и практическими задачами.

Интенсивное развитие технологий, имеющих глобальное значение, например, - космической связи и навигации, вызвало необходимость использования научно-технического потенциала многих стран мира с созданием международных координационных центров. Степень участия какого-либо государства в соответствующих проектах характеризует уровень его развития и является приоритетным международным ориентиром.

К глобальным технологиям можно в полной мере отнести методы и средства, применяемые при использовании ГИС (геоинформационных систем) и GPS (Global Positioning System). ГИС и GPS посвящен сайт {<http://www.gisa.ru/>}. Пожалуй, самым эффективным применением ГИС- и GPS-технологий является организация различных мониторингов состояний окружающей среды и отдельных объектов - как природных, так и созданных человеком. Соответствующая задача начинает решаться в Донбассе, опасное экологическое состояние которого общеизвестно.

Одним из мощных средств поддержки указанных глобальных технологий является лазерная локация космических объектов (КО), в основном – искусственных спутников Земли. Обычно, она решает две задачи: весьма точное, по сравнению с другими методами, определение координат КО при известных координатах пунктов расположения лазерных локационных станций (ЛЛС) и такое же точное определение координат этих пунктов при известных координатах КО. Последнее относится к прецизионным определениям смещений элементов земной поверхности под воздействием природных и техногенных факторов. Как

правило, с помощью ЛЛС измеряют дальности КО, изменяющиеся по мере их движения. Полные координаты КО в отдельные моменты времени вычисляются в международных центрах обработки информации. Она поступает через "Internet" от пунктов размещения ЛЛС. Технически развитые страны мира имеют сети таких станций или отдельные ЛЛС, которые образуют глобальную сеть, относящуюся к центру обработки информации "International Laser Ranging Service» (США) {<http://ilrs.gsfc.nasa.gov/>}. Он объединяет только ЛЛС мирового уровня, имеющие точности определения координат КО не хуже 10 см и предельные дальности действия около 30000 км.



Рисунок 1 – ЛЛС глобальной сети «ILRS»

Несмотря на то, что принципы действия ЛЛС и радиолокационных станций (РЛС) близки и понятны даже неспециалисту, лазерные спутниковые системы довольно сложны, и их построение вызывает много споров в части требований к параметрам отдельных устройств. Выбор этих параметров с учетом назначения станции определяет эффективность ее применения и часто играет решающую роль. Поэтому ниже проанализированы разные варианты построения ЛЛС с использованием элементов теории оптимизации и с привлечением экспериментальных данных, полученных ведущими научными коллективами за рубежом. Экспериментальный перебор вариантов построения станции одним коллективом ученых или даже одной страной экономически нецелесообразен ввиду значительной стоимости таких работ.

Анализ последних достижений и публикаций

Оптимальное построение ЛЛС привлекало внимание специалистов еще при становлении лазерной локации, как новой области радиофизики, в 60-е годы прошлого столетия. Некоторое оживление интереса к этому

вопросу проявилось в 80-х годах, когда в активных элементах передающих устройств ЛЛС гранат начал вытеснять рубин. В конце 90-х годов прошлого столетия появились предложения существенно изменить энергетические соотношения при лазерной локации спутников для облегчения режима работы лазера за счет использования передовых технологий квантовой электроники и быстро развивающихся компьютерных средств обработки информации. В соответствии с этой концепцией NASA США был разработан проект системы «SLR 2000», который был представлен на 11 конференции "ILRS" в Германии в 1998 году. Архив материалов находится по адресу {<http://www.wettzell.ifag.de/veranstaltungen/slr/11thlaserworkshop/>}. Экспериментальная проверка системы «SLR 2000» состоялась в 2004 году. Тогда же на 14-ой конференции "ILRS" в Испании были показаны результаты этой работы вместе с результатами выполнения однотипного проекта в Астрономической обсерватории (АО) Граца (Австрия). Архив материалов находится по адресу {<http://cddis.gsfc.nasa.gov/lw14/index.html>}. Оказалось, что достичь поставленной цели по облегчению режима работы лазера наряду с улучшением важнейших характеристик ЛЛС в достаточной степени не удалось. К этим важнейшим характеристикам относятся: предельная дальность действия ЛЛС и точность измерения дальности космического объекта (КО). Предельная дальность действия характеризует максимальное расстояние до КО, дальность которого еще можно измерить.

Суть концепции системы «SLR 2000» заключается в уменьшении на несколько порядков энергии излучения каждого из зондирующих импульсов передатчика ЛЛС с таким же повышением частоты следования этих импульсов. В теоретическом обосновании [1] данной концепции упор делался на увеличение или сохранение средней мощности лазера по сравнению с тем же параметром хорошо зарекомендовавших себя ЛЛС, например, - серии «MOBLAS». При этом предполагалось, что указанные выше наиболее важные характеристики станции, по крайней мере, не ухудшатся. В том же обосновании [1] влияние шумов аналитически не учитывалось и вероятность ложной тревоги (принятия шума за сигнал) не рассматривалось. Весьма существенно еще то, что влияние длительности лазерного импульса на упомянутые важнейшие характеристики ЛЛС не принималось во внимание. Однако здесь надо отметить большие конструктивные и технологические успехи коллектива, создававшего систему «SLR 2000».

Постановка задачи

Необходимо выполнить анализ причин, не позволивших в достаточной степени получить ожидаемые результаты при создании системы «SLR 2000», и предложить теоретическую модель для оценок эффективности того или иного построения ЛЛС с привлечением экспериментально полученных данных для проверки теоретических положений.

Изложение материала с обоснованием полученных результатов.

В начале 90-х годов прошлого столетия автором настоящей работы была предложена методика определения эффективности применения ЛЛС различной конфигурации с позиций теории оптимизации, которая была развита в работе [2] и является ее частью. К тому же, в работе [2] показано, что шумы оказывают сильное влияние на вероятность обнаружения сигналов, отраженных от КО, при малом среднем количестве принимаемых сигнальных фотонов $\bar{N}_s < 1$ за M посылок зондирующего импульса, как в большинстве ЛЛС.

В работе [2] за основу для рассуждений принималось локационное уравнение, предложенное широко известным специалистом по радиолокации М. Сколником (США) [3]:

$$P_t = \frac{4\pi \cdot R^4 \cdot P_r \cdot \Theta_t^2}{A_e \cdot \sigma \cdot S_t \cdot S_r}, \quad (1)$$

где P_t – импульсная мощность передатчика (лазера) ЛЛС; R – расстояние до КО; P_r – пороговая мощность приема отраженного сигнала; Θ_t – угловая ширина луча передающего телескопа; A_e – площадь апертуры приемного телескопа; σ – эффективная площадь рассеивания КО; S_t – коэффициент пропускания атмосферы; S_r – коэффициент пропускания оптических элементов ЛЛС. Средняя мощность передатчика может быть записана так: $P_a = P_t \cdot \tau_{zu} \cdot f_{zu} = E_{zu} \cdot f_{zu}$. Здесь τ_{zu} и f_{zu} – соответственно длительность и частота следования зондирующих импульсов передатчика; E_{zu} – энергия его зондирующего импульса, равная энергии E лазера. Заметим, что средняя мощность более характерна для РЛС обзора пространства радиодиапазона, а не импульсных ЛЛС. В лазерных станциях трудно достичь больших значений P_a из-за принципиальных энергетических ограничений твердотельных квантовых генераторов и усилителей.

В выражении (1) пороговая мощность P_r определяет уровень мощности электрического сигнала от фотодетектора, ниже которого этот сигнал не может быть зарегистрирован остальными устройствами ЛЛС. В качестве фотодетекторов обычно применяются фотоэлектронные умножители (ФЭУ). Для квантовых систем в соответствии с [3] имеем:

$$P_r = \frac{N_s h \nu}{\eta \tau_s}, \quad (2)$$

где N_s - минимальное количество фотонов на входе фотодетектора, достаточное для регистрации остальными устройствами ЛЛС сигнала, отраженного от КО, т.е. - энергетический порог; h - постоянная Планка; ν - частота оптического сигнала; η - квантовая эффективность фотодетектора; τ_s - временной интервал наблюдения сигнала.

Заметим, что в формулу (2) входит отношение $N_s h \nu / \tau_s$, имеющее размерность мощности. В его числителе – энергия фотонов с количеством N_s . В знаменателе – временной интервал τ_s , в течение которого эти фотоны регистрируются. Данный интервал может устанавливаться в электронных устройствах ЛЛС и носит название «временные ворота». Чем этот интервал короче, тем меньше вероятность регистрации фотонов шума от посторонних источников света, но чувствительность приема ниже, т.к. порог P_r - выше, и - наоборот. Входящая в формулу (2) квантовая эффективность $\eta < 1$, поэтому порог P_r регистрации электрических сигналов от фотодетектора выше, чем в идеальном случае - при $\eta = 1$. Значение N_s в формуле (2) - целое число, и для дискретного способа приема может иметь минимальное значение $N_s = 1$. Однако при подсчете упомянутого выше среднего количества пришедших от КО фотонов за M посылок зондирующего импульса передатчика, когда $\bar{N}_s < 1$ можно говорить о чувствительности приемного устройства ЛЛС «в десятые, сотые и т.д. доли фотона», сигнального, пришедшего от КО. Но на значении N_s в формуле (2) это никак не сказывается, оно остается целым и не меньшим, чем $N_s = 1$.

Погрешность измерения дальности КО при любых способах приема отраженного от КО сигнала в первом приближении может быть представлена следующим выражением [4, 5]:

$$\Delta R \approx K_r \frac{\tau_{zu}}{\sqrt{N_s M}}, \quad (3)$$

где $K_r \approx 0,5c$; c - скорость света; \bar{N}_s - среднее количество фотонов сигнала в пределах τ_s за M посылок зондирующего импульса, приходящееся на участок движения КО, для которого усредняются результаты измерений при расчетах погрешности. При накоплении результатов отдельных измерений погрешность ΔR может быть уменьшена в \sqrt{M} раз в соответствии с правилами вычисления дисперсии случайной величины, но не становится меньше, чем в 10 раз, как показано в работе [4]. Поэтому для получения объективных сравнительных оценок эффективности применения того или иного варианта построения ЛЛС при больших отличиях по f_{zu} необходимо, прежде всего, рассматривать однократный режим измерений при $M = 1$.

Учитывая упомянутые выше важнейшие характеристики, выберем в соответствии с теорией оптимизации [6] для всех рассматриваемых вариантов построения ЛЛС два показателя качества: предельную дальность действия R_{\max} и погрешность измерений дальности ΔR . Эти показатели качества (критерии оптимизации) характеризуют эффективность применения ЛЛС. Чем больше значение R_{\max} и чем меньше значение ΔR , тем лучше ЛЛС, и эффективность ее применения выше.

Для первого показателя качества может быть записано следующее выражение, полученное из формулы (1):

$$R_{\max} = 4 \sqrt{\frac{P_{t\max} \cdot A_e \cdot \sigma \cdot S_t \cdot S_r}{4\pi \cdot P_r \cdot \Theta_t^2}}, \quad (4)$$

где $P_{t\max}$ - максимальная импульсная мощность передатчика, соответствующая предельной дальности действия R_{\max} .

Второй показатель качества ΔR определяется формулой (3).

Для наглядного численного представления результатов анализа эффективностей применения различных лазеров в ЛЛС введем комплексный показатель качества в виде дроби, который прямо пропорционален предельной дальности действия станции R_{\max} и обратно пропорционален относительной погрешности измерений дальности $\Delta R/R_{\max}$. Комплексный показатель качества известен из теории оптимизации [6].

После подстановки формулы (2) в выражение (4) и обоснованных преобразований и допущений, приведенных в работе [2], которые упрощают выражение для комплексного показателя качества, получим:

$$F = \frac{R_{\max}}{\Delta R/R_{\max}} = K \sqrt{\frac{P_{t\max} \cdot S_t \eta}{\tau_{zu} \cdot \lambda^3}}, \quad (5)$$

где K – постоянный коэффициент для всех рассматриваемых ЛЛС; λ – длина волны излучения лазера, что позволяет применять предложенный метод анализа для разных активных сред.

Комплексный показатель качества (5) в теории оптимизации еще называют целевой функцией. Это название отражает цель анализа – стремление к оптимальности. Чем больше значение F , тем ближе характеристики ЛЛС к оптимальным. При этом предельная дальность действия станции R_{\max} увеличивается и (или) погрешность измерений дальности ΔR – уменьшается.

При выводе формулы (5) для упрощения и наглядности были приняты следующие условия.

КО оснащен уголковыми отражателями, параметры которых неизменны. Предполагалось также, что в ЛЛС изменяются только параметры применяемого лазера. Регистратор и фотодетектор одинаковые для всех рассматриваемых вариантов построения ЛЛС. Телескопы тоже одинаковые. Расходимости излучения лазеров учитывались как дифракционные для всех вариантов построения ЛЛС. Принималось, что $N_s = \bar{N}_s \geq 1$, т.к. рассматривается однократный режим работы ЛЛС при $M = 1$, как указывалось выше. Это означает также, что от КО приходит такое количество фотонов, которое достаточно для регистрации отраженного от КО сигнала. В формуле (2) N_s не может быть меньше единицы. Вводилось также условие, что $\tau_s \approx \tau_{zu}$, что в принципе может иметь место. Заметим, что в случае использования одинаковых устройств сравниваемых ЛЛС, кроме лазеров, и одинаковых средств обработки информации, возможности отдельных станций в однократном и частотном режимах работы взаимосвязаны.

Как видно из формулы (5), лучшими будут ЛЛС, которые имеют как можно большие значения $P_{t\max}$ при одинаковых или близких остальных параметрах или минимальные значения τ_{zu} при том же условии. В первом случае обеспечивается максимальная дальность действия станции, во втором – минимальная погрешность измерений дальности КО в соответствии с формулой (3). Возможна также одновременная максимизация числителя ($P_{t\max}$) и минимизация знаменателя (τ_{zu}) первой дроби под корнем. При этом F будет иметь еще большие значения, и ЛЛС будет еще лучше по принятому комплексному критерию оптимизации.

При близких значениях τ_{zu} передатчиков ЛЛС можно преобразовать формулу (5) и при анализе ориентироваться на энергию лазерного импульса $E = E_{zu}$. При этом целевая функция характеризует, в

основном, предельную дальность действия ЛЛС при ослабленном отражении ее точности:

$$F' = K \frac{1}{\tau_{3и}} \sqrt{P_{t\max} \cdot \tau_{3и} \cdot \frac{S_t \eta}{\lambda^3}} = K' \sqrt{E_{3и} \frac{S_t \eta}{\lambda^3}}. \quad (6)$$

Все КО, наблюдаемые ЛЛС, можно условно разделить на три вида: низкие, для них $R_{\max} \leq 5000$ км (например, “АЛСАГ”, “ТОРЕХ”); средние по высоте, для них $5000 \leq R_{\max} \leq 10000$ км (например, “LAGEOS”) и высокие, для которых $R_{\max} \geq 10000$ км (например, “GPS”, “ЭТАЛОН”).

В таблице 1 приведены результаты расчетов значений F по формуле (5). Рассматривались следующие варианты построения системы: ЛЛС с лазером «1», как у SLR 2000; ЛЛС с лазером «2», как в АО Граца; ЛЛС с лазером «3», как в Астрономической обсерватории Львовского национального университета (АО ЛНУ). Лазер «3» близок по параметрам к лазеру системы «MOBLAS».

В таблице 2 показаны результаты расчетов значений F' по формуле (6). Рассматривалась ЛЛС с лазером «4», как в Крымской астрофизической обсерватории и с лазером «1» из таблицы 1. Длительности зондирующих импульсов этих ЛЛС близки, как и средние мощности лазеров при различиях по $P_{t\max}$ и по E около 10^3 .

Все рассматриваемые лазеры выполнены на гранате с удвоением частоты излучения. Коэффициент пропускания атмосферы принимался как $S_t = 0,44$; квантовая эффективность фотодетектора (ФЭУ) принималась как $\eta = 0,3$. Это усредненные данные из нескольких источников. Размерности были опущены, что соответствует правилам теории оптимизации. $E = E_{3и}$.

Таблица 1 – Результаты расчетов значений F по формуле (5), $K = 1$

Тип лазера	λ , мкм	$P_{t\max}$, МВт	$\tau_{3и}$, нс	E , Дж	$f_{3и}$, Гц	P_a , Вт	F
«1»	0,532	0,32	0,42	135×10^{-6}	2×10^3	0,27	0,82
«2»	0,532	40	0,01	400×10^{-6}	2×10^3	0,8	59,5
«3»	0,532	770	0,13	100×10^{-3}	5,0	0,5	72,5

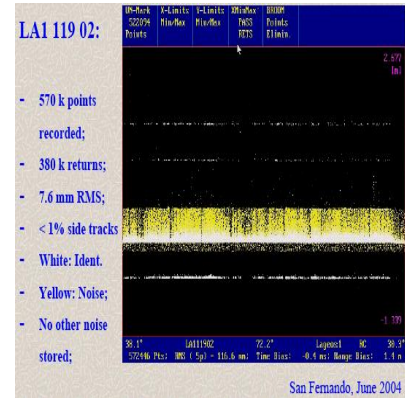
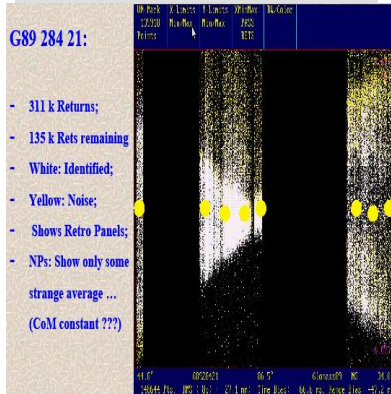
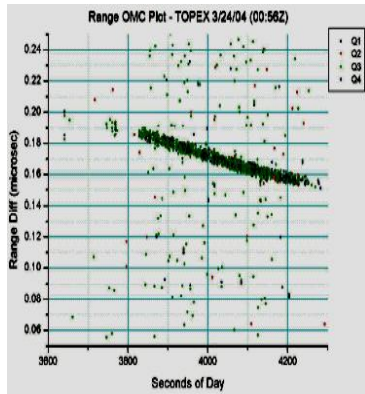
Таблица 2 – Результаты расчетов значений F' по формуле (6), $K' = 1$

Тип лазера	λ , мкм	$P_{t\max}$, МВт	τ_{zu} , нс	E , Дж	f_{zu} , Гц	P_a , Вт	F'
«4»	0,532	286	0,35	0,1	5,0	0,5	15,9
«1»	0,532	0,32	0,42	135×10^{-6}	2×10^3	0,27	0,53

Из данных таблицы 1 видно, что самой низкой эффективностью по F обладает система с лазером «1», как у SLR 2000, наивысшую эффективность имеет ЛЛС с лазером «3», как у “MOBLAS” и ЛЛС АО ЛНУ, промежуточное положение занимает ЛЛС с лазером «2» как у ЛЛС АО Граца. Таблица 2 показывает явное преимущество ЛЛС с лазером «4» над ЛЛС с лазером «1» по показателю F' .

На рис. 1-3 показаны результаты экспериментов, проведенных в США и в Австрии, заимствованные из материалов 14-ой конференции “ILRS” в Испании и подтверждающие правильность результатов выполненного теоретического анализа. На этих рисунках показаны в виде точек отклики от КО и шумы, поступающие на регистратор в виде однофотозлектронных импульсов (ОФЭИ) от фотодетектора. Шкалы по вертикали – расстояния до КО в виде прилегающих к предвычисленному значению увеличенных участков, по горизонтали – текущее время сеансов локации. Видно, что система SLR 2000 с лазером «1» дает четкий «след» на фоне шумов от низкого спутника “TOPEX” (рис.1), для средних и высоких спутников получить такой же результат не удалось. ЛЛС АО Граца с лазером «2» дает такой же «след» для среднего по высоте спутника “LAGEOS” (рис.2), а для высокого спутника “GPS” наблюдаются шумы, размывающие изображение «следа», или вообще нет ОФЭИ. По данным автора и многих конференций ЛЛС с лазерами «3» и «4» уверенно обнаруживают и позволяют наблюдать КО всех трех оговоренных выше видов.

Наиболее точной по дальности оказывается ЛЛС с лазером «2», благодаря минимальному значению τ_{zu} . Это обеспечило ей значение F , немногим меньшее, чем у ЛЛС с лазером «3», несмотря на значительно меньшее значение $P_{t\max}$. За счет укороченного зондирующего импульса у ЛЛС с лазером «2» P_t на два порядка выше, чем у ЛЛС с лазером «1». Поэтому уменьшение τ_{zu} выгодно не только для повышения точности по дальности, но и для увеличения $P_{t\max}$, а значит и предельной дальности действия ЛЛС.



Рисунки 2, 3, 4 (слева-направо) – Отклики от КО “Торех”, «LAGEOS» и изображение для «GPS» на экранах дисплеев ЛЛС «SLR 2000» и АО Граца

Выводы и перспективы развития данного направления

Таким образом, в отличие от концептуального положения проекта SLR 2000, средняя мощность P_a не может являться критерием для оценок эффективности ЛЛС с различными вариантами построения. Преобладающее влияние имеет импульсная мощность P_t , увеличение которой повышает предельную дальность действия R_{max} и способствует улучшению точности системы по дальности (уменьшению ΔR) в соответствии с формулой (3), когда \bar{N}_s становится больше. Уменьшение длительности зондирующего импульса τ_{zu} целесообразно в любом случае для увеличения импульсной мощности P_t и для повышения точности измерений дальности ЛЛС. Увеличение частоты следования зондирующих импульсов f_{zu} полезно для повышения оперативности ЛЛС.

В развитие данного направления исследований необходимо определение всех коэффициентов локационного уравнения (1) при проведении астрономических наблюдений и их учет с накоплением данных для прогнозирования результатов измерений. Затем необходима разработка

уточненной теоретической модели с введением условий работы ЛЛС и экспериментальная ее проверка. Это позволит адаптивно управлять станцией.

Рассмотрены попытки разных коллективов специалистов достичь оптимального построения спутниковых лазерно-локационных станций (ЛЛС). Проанализировано современное состояние соответствующей научной отрасли. Показано, что для оптимизации ЛЛС по наиболее важным показателям необходимы другие критерии по сравнению с ранее предложенными.

The attempts of different collectives of specialists to attain the optimum construction of the satellite laser-locating stations (LLS) are considered. The modern state of the proper scientific industry is analyzed. It is shown that for optimization of LLS on the most essential indexes other criteria are needed as compared to before offered.

Библиографический список.

1. Degan J. *United Approach to Photon-Counting Microlaser Ranges, Transponder and Altimeters // Geosciences Technology Office, Code 920.3 NASA Goddard Space Flight Center Greenbelt. – MD20771USA. – 2001. – С. 431-447.*

2. Денищик Ю.С., Дрюченко А.М., Нагай И.В. *Лазерная локация спутников // Вестник астрономической школы. – Киев: Изд. Национального авиационного университета. – 2002. – Т 3, № 2. – С.58 - 69.*

3. *Radar Handbook. Editor-In-Chief Merrill I. Skolnik. – McGraw-HILL BOOK Company. – 1970.*

4. Гамал К. *Состояние и перспективы использования техники лазерной локации ИСЗ // Квантовая электроника. – 1976. – Т. 3. - С.1158 – 1160.*

5. *Лазерные измерительные системы / А.С. Батраков, М.М. Бутусов, Г.П. Гречка и др.; под ред. Д.П. Лукьянова. – Москва: Радио и связь. - 1981.-456 с.*

6. Гуткин Л.С. *Оптимизация радиоэлектронных устройств по совокупности показателей качества. Москва: Советское радио. - 1975. - 368 с.*

*Рекомендовано к печати
д. т. н., проф. Зеленовым А.Б.*