

## ОБ ОПТИМАЛЬНОМ ПОСТРОЕНИИ СПУТНИКОВЫХ ЛАЗЕРНЫХ ЛОКАЦИОННЫХ СТАНЦИЙ

Denischik Yu. (Donbas State Technical University, State Inter-Institute Center "Orion" of Laser Location Observation for the Satellites, Alchevsk, UKRAINE), [belami@usr.lg.ua](mailto:belami@usr.lg.ua)

Оптимальное построение лазерных локационных станций (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.wetzell.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://cdis.gsfc.nasa.gov/lw14/index.html>}. Оказалось, что достичь поставленной цели по облегчению режима работы лазера наряду с улучшением важнейших характеристик ЛЛС в полной мере 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. Однако здесь надо отметить большие конструктивные и технологические успехи коллектива, создававшего систему «SLR 2000».

В конце 80-х годов прошлого столетия на научных конференциях Латвийского университета (ЛУ) нами отмечалась ведущая роль энергетических характеристик каждого зондирующего импульса передатчика ЛЛС, а не серии их, в получении высокой эффективности лазерной локации. В наших совместных с АО ЛУ работах по модернизации ЛЛС мы придерживались именно этой концепции, что приводило к успеху. Данные находятся по адресу {[http://home.lanet.lv/~iga/satlazla\\_eng.html](http://home.lanet.lv/~iga/satlazla_eng.html)}. Позже была предложена методика анализа эффективностей применения ЛЛС различной конфигурации с позиций теории оптимизации. Эта методика является частью работы [2]. В работе [2] также 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 М посылок зондирующего импульса. Это характерно для большинства ЛЛС.

В упомянутой выше методике за основу для рассуждений принималось локационное уравнение, предложенное в [3]:

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

где  $P_t$  – импульсная мощность передатчика (лазера) ЛЛС;  $R$  – расстояние до КО;  $P_r$  – пороговая мощность приема отраженного сигнала;  $\Theta_t$  – угловая ширина луча передающего телескопа;  $A_e$  – площадь апертуры приемного телескопа;  $\sigma$  – эффективная площадь рассеивания КО;  $S_t$  – коэффициент пропускания атмосферы;  $S_r$  – коэффициент пропускания оптических элементов ЛЛС. Средняя

мощность передатчика может быть записана так:  $P_a = P_t \tau_{\text{зи}} f_{\text{зи}} = E_{\text{зи}} f_{\text{зи}}$ . Здесь  $\tau_{\text{зи}}$  и  $f_{\text{зи}}$  – соответственно длительность и частота следования зондирующих импульсов передатчика;  $E_{\text{зи}}$  – 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;  $\nu$  – частота оптического сигнала;  $\eta$  – квантовая эффективность фотодетектора;  $\tau_s$  – 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  $\tau_s$ , 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 значениях  $N_s$  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]:

$$\Delta R \approx K_r \frac{\tau_{\text{зи}}}{\sqrt{\bar{N}_s M}}, \quad (3)$$

где  $K_r \approx 0,5 \cdot c$ ;  $c$  – скорость света;  $\bar{N}_s$  – среднее количество фотонов сигнала в пределах  $\tau_s$  за  $M$  посылок зондирующего импульса, приходящееся на участок движения КО, для которого усредняются результаты измерений при расчетах погрешности. При накоплении результатов отдельных измерений погрешность  $\Delta R$  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  $f_{\text{зи}}$  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  $R_{\text{max}}$  и погрешность измерений дальности  $\Delta R$ . Эти показатели каче-

ства (критерии оптимизации) характеризуют эффективность применения ЛЛС. Чем больше значение  $R_{\max}$  и чем меньше значение  $\Delta R$ , тем лучше ЛЛС, и эффективность ее применения выше.

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

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

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

Второй показатель качества  $\Delta R$  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:

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

где  $K$  – постоянный коэффициент для всех рассматриваемых ЛЛС;  $\lambda$  – 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  $\Delta R$  – 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  $N_s = \bar{N}_s \gg 1$ , 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  $\tau_s \gg \tau_{зи}$ , 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  $\tau_{зи}$  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 ( $\tau_{зи}$ ) 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  $\tau_{зи}$  передатчиков ЛЛС можно преобразовать формулу (5) и при анализе ориентироваться на энергию лазерного импульса  $E = E_{зи}$ . При этом целевая функция характеризует, в основном, предельную дальность действия ЛЛС при ослабленном отражении ее точности.

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

Все КО, наблюдаемые ЛЛС, можно условно разделить на три вида: низкие, для них  $R_{\max} \lesssim 5000$  км (например, “AJISAI”, “TOPEX”); средние по высоте, для них  $5000 \lesssim R_{\max} \lesssim 10000$  км (например, “LAGEOS”) и высокие, для которых  $R_{\max} \gtrsim 10000$  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.  $E = E_{зи}$ .

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

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

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

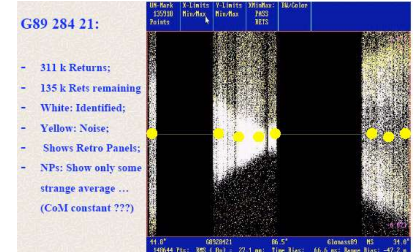
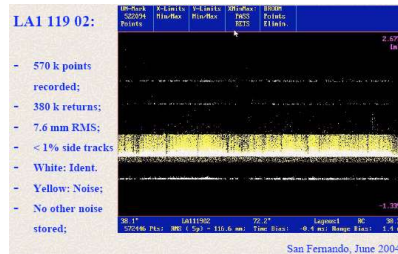
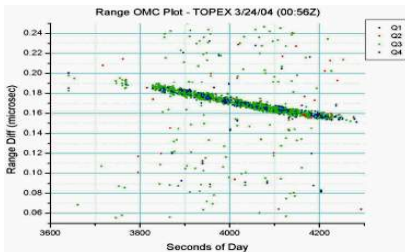
Тип лазера	$\lambda$ , мкм	$P_{t \max}$ , МВт	$\tau_{зи}$ , нс	$E$ , Дж	$f_{зи}$ , Гц	$P_a$ , Вт	$F'$
«4»	0,532	286	0,35	0,1	5,0	0,5	15,9
«1»	0,532	0,32	0,42	$135 \times 10^{-6}$	$2 \times 10^3$	0,27	0,53

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, например, [7],

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  $\tau_{\text{зи}}$ . 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  $\tau_{\text{зи}}$  выгодно не только для повышения точности по дальности, но и для увеличения  $P_{t \max}$ , а значит и предельной дальности действия ЛЛС.



Рисунки 1, 2, 3 (слева - направо) – Отклики от КО «Торех», «LAGEOS» и изображение для «GPS»

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  $\Delta R$ ) в соответствии с формулой (3), когда  $\overline{N_s}$  становится больше. Уменьшение длительности зондирующего импульса  $\tau_{\text{зи}}$  целесообразно в любом случае для увеличения импульсной мощности  $P_t$  и для повышения точности измерений дальности ЛЛС. Увеличение частоты следования зондирующих импульсов  $f_{\text{зи}}$  полезно для повышения оперативности ЛЛС. Конкретные значения необходимых для ЛЛС параметров передатчика могут устанавливаться путем обобщения опыта эксплуатации существующих систем и учета внутренних и внешних условий функционирования ЛЛС для нахождения соответствующих коэффициентов уравнения (1).

Проиллюстрировать увеличение предельной дальности действия ЛЛС при уменьшении длительности зондирующего импульса передатчика и соответствующем увеличении его импульсной мощности можно следующим образом.

Если взять лампу накаливания, и разрядить на нее за 1 секунду конденсатор с накопленной энергией 1 Дж, то лампа будет гореть с мощностью 1 Вт. Этот свет можно увидеть на близком расстоянии, например, 100 м. За километр этот свет трудно увидеть. А если взять лампу-вспышку и рассеять в ней ту же энергию 1 Дж за 1 мс, то мощность составит 1 кВт. Такой свет можно увидеть на значительно большем расстоянии, чем в первом случае. Это потому, что во втором случае мы имеем большую импульсную мощность – яркость источника света.

## Литература

1. Degnan J. United Approach to Photon-Counting Microlaser Rangers, Transponder and Altimeters // Geoscience Technology Office, Code 920.3 NASA Goddard Space Flight Center Greenbelt. – MD 20771 USA. – 2001. – С. 431-447.
2. Денищик Ю.С., Дрюченко А.М., Нагай И.В. Лазерная локация спутников // Вестник астрономической школы. – Киев: Издательство 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.

7. Тезисы 3 научной конференции “Избранные вопросы астрономии и астрофизики”, посвященной памяти Богдана Бабя. – Львов: Издательство львовского национального университета. - 2002.

23.01.2006 г.