

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

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. 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; 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: $P_a = P_t \tau_{\text{зи}} f_{\text{зи}} = E_{\text{зи}} f_{\text{зи}}$. 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; 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 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 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 $f_{\text{зи}}$ 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_{max} и погрешность измерений дальности ΔR . Эти показатели каче-

ства (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):

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

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

Второй показатель качества 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:

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

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 $N_s = \bar{N}_s \gg 1$, 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	λ , мкм	$P_{t \max}$, МВт	$\tau_{зи}$, нс	E , Дж	$f_{зи}$, Гц	P_a , Вт	F
«1»	0,532	0,32	0,42	135×10^{-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), $K' = 1$

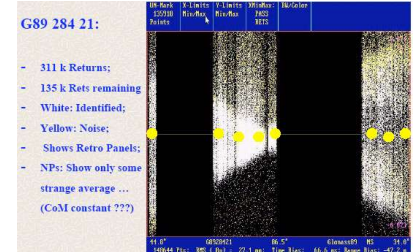
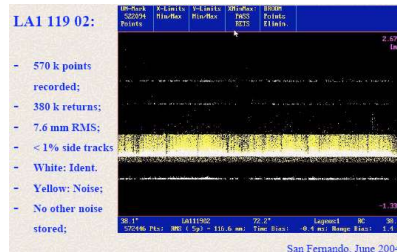
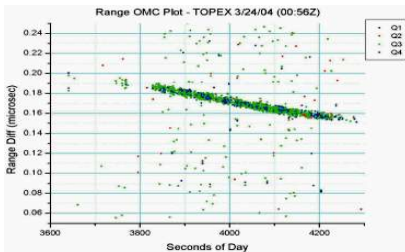
Тип лазера	λ , мкм	$P_{t \max}$, МВт	$\tau_{зи}$, нс	E , Дж	$f_{зи}$, Гц	P_a , Вт	F'
«4»	0,532	286	0,35	0,1	5,0	0,5	15,9
«1»	0,532	0,32	0,42	135×10^{-6}	2×10^3	0,27	0,53

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, 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 ΔR) 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.