

## ПОТЕНЦИАЛЬНАЯ ТОЧНОСТЬ ИЗМЕРЕНИЯ НАКЛОННОЙ ДАЛЬНОСТИ С УЧЕТОМ ИНЕРЦИОННОСТИ ВХОДНОЙ ЦЕПИ ПРИЕМНОЙ СИСТЕМЫ

ЛЕ ВУ ДИН, Е. Г. ЛЕБЕДЬКО, НГУЕН ТУНГ ДЫК, ЛЮ ЛУ

Университет ИТМО, 197101, Санкт-Петербург, Россия  
E-mail: ldvu81@rambler.ru

Оценивается потенциальная точность измерения наклонной дальности до наземных объектов при сложной структуре облучаемой подстилающей поверхности в условиях инерционного приема с учетом шумов усилительного устройства в сочетании с инерционностью входной цепи. Анализируется влияние расширения полосы пропускания приемно-усилительного тракта на потенциальную точность во избежание наложения сигнальных выбросов от подстилающей поверхности и объекта локации. Приводится оценка энергетических и точностных потерь.

**Ключевые слова:** дисперсия оценки времени запаздывания, наклонная дальность, нестационарное облучение, зондирующий сигнал, инерционность входной цепи, время запаздывания

Измерению дальности до наземных объектов современными лазерными дальномерами, их построению, пороговой чувствительности и погрешностям измерения посвящено большое количество публикаций [1—9].

При измерении больших наклонных дальностей, даже при достаточно узких полях излучения, протяженность облучаемой поверхности может составлять несколько десятков метров. При этом отражательные импульсные характеристики таких облучаемых подстилающих поверхностей могут иметь несколько энергетических центров, разнесенных во времени [10], а сигнальные выбросы от цели могут быть сопоставимы (и даже меньше) с выбросами сигнала, отраженного от подстилающей поверхности; сигнальные выбросы от подстилающей поверхности могут располагаться в непосредственной близости к сигнальным выбросам от цели. Такая ситуация имеет место в случае, когда пятно излучения наряду с целью покрывает различные неровности подстилающей поверхности, например валуны, кусты, деревья и т.д. (рис. 1, здесь  $s(t)$  — отраженный сигнал,  $\gamma$  — угол визирования,  $\beta$  — угол расходимости излучения).

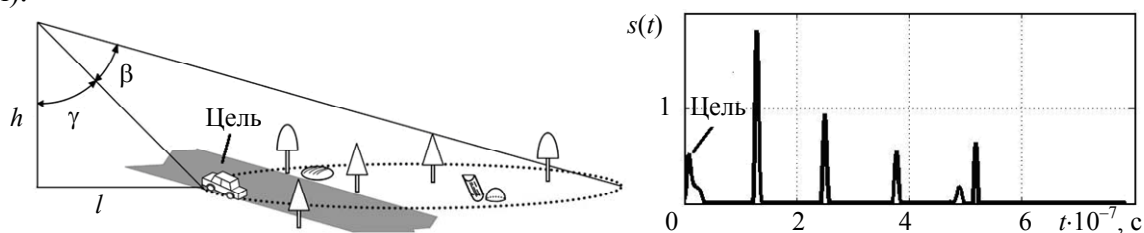


Рис. 1

В этих условиях осуществить амплитудную селекцию сигнальных выбросов не представляется возможным. Одним из возможных методов измерения наклонной дальности до цели в этом случае является совмещение линии визирования с нижним краем диаграммы направленности излучения. Тогда первый принимаемый сигнальный выброс можно считать несущим информацию о дальности. Естественно, что при этом могут быть существенные энергетические потери, которые непосредственно сказываются на погрешности оценки времени запаздывания сигнального выброса от цели [11].

На рис. 2 приведен график энергетических потерь ( $k$ ), усредненный по нескольким реализациям отраженного сигнала при изменении угла визирования  $\gamma$  от 5 до 89° при заданной дистанции, например, при облучении поверхности на дистанции 10 км. Эти энергетические потери влияют также и на условия обнаружения сигнального выброса от цели.

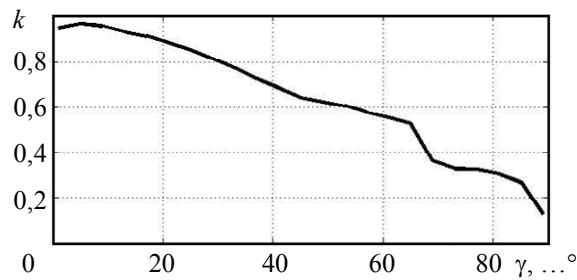


Рис. 2

При использовании фотодиодов в качестве фотоприемников необходимо учитывать инерционность входной цепи и шумы входного каскада усилителя. В этом случае энергетический спектр шумов, приведенных ко входу, определяется как [12]

$$G(\omega) = G_1(1 + m + mT^2\omega^2), \quad (1)$$

где  $G_1$  — энергетический спектр шумов входной цепи;  $T$  — постоянная времени входной цепи;  $m = G_2/G_1$ ;  $G_2$  — энергетический спектр шумов усилителя приемного тракта.

Потенциальная точность будет определяться с учетом оптимальной передаточной функции приемного тракта [13]. Однако ширина такой передаточной функции существенно меньше, чем ширина полосы пропускания согласованного фильтра, настроенного на прием сигнального выброса от цели [14]. При сложной структуре подстилающей поверхности и соответственно отраженного от цели сигнала применение оптимального фильтра в условиях окрашенных шумов (1) может привести к наложению сигнального и помехового выбросов на его выходе, а следовательно, и к увеличению погрешности измерения. Этот фактор указывает на необходимость использования передаточной функции с более широкой полосой пропускания, т.е. применения неоптимальной фильтрации в условиях инерционного приема.

Возникающие при этом потери потенциальной точности измерения оценим для двух случаев:

- 1) по отношению к оптимальной фильтрации при инерционном приеме — по формуле [14]

$$\xi_1 = \frac{\int_0^\infty \frac{\omega^2 (1 + m + mT_n^2\omega^2) |S(j\omega)|^2 d\omega}{(1 + m + mT_n^2n^2\omega^2)^2}}{\left[ \int_0^\infty \frac{\omega^2 S(j\omega) S^*(jn\omega) d\omega}{1 + m + mT_n^2n^2\omega^2} \right]^2} \int_0^\infty \frac{\omega^2 |S(j\omega)|^2 d\omega}{1 + m + mT_n^2\omega^2}; \quad (2)$$

- 2) по отношению к оптимальной фильтрации при равномерном энергетическом спектре входных шумов и наличии отражения только от цели — по формуле

$$\xi_2 = \frac{\int_0^\infty \frac{\omega^2 (1 + m + mT_n^2\omega^2) |S(j\omega)|^2 d\omega}{(1 + m + mT_n^2n^2\omega^2)^2}}{\left[ \int_0^\infty \frac{\omega^2 k S(j\omega) S^*(jn\omega) d\omega}{1 + m + mT_n^2n^2\omega^2} \right]^2} \int_0^\infty \frac{\omega^2 |S(j\omega)|^2 d\omega}{1 + m}, \quad (3)$$

где  $S(j\omega)$  — спектральная функция сигнального выброса от цели,  $n$  — коэффициент расширения полосы пропускания приемно-усилительного тракта ( $n < 1$ ),  $k$  — коэффициент энергетических потерь.

При расчетах по формулам (2) и (3) были приняты условия, что при заданных энергии и величине сигнала его форма практически не влияет на погрешность оценки времени запаздывания [15]. Таким образом, при аппроксимации отраженного сигнального выброса от цели гауссовой функцией соотношения (2) и (3) принимают следующий вид:

$$\xi_1 = \frac{\frac{n(1+n^2)}{2} \left[ \frac{\sqrt{\pi}}{2} \left( 1 + \frac{2}{v^2} \right) H\left(\frac{1}{v}\right) - \frac{1}{v^2} \right]}{\left[ 1 - \sqrt{\pi} \cdot H\left(\frac{1}{v_1}\right) \right]^2} + \frac{\frac{1+n^2}{2n} \left[ 1 + \frac{1}{v^2} - \frac{\sqrt{\pi}}{2} \left( 3 + \frac{2}{v^2} \right) H\left(\frac{1}{v}\right) \right]}{\left[ 1 - \sqrt{\pi} \cdot H\left(\frac{1}{v_1}\right) \right]^2} \left[ 1 - \sqrt{\pi} \cdot H\left(\frac{1}{v}\right) \right]; \quad (4)$$

$$\xi_2 = \frac{(1+n^2)v^2}{4n} \frac{1}{k^2 \left[ 1 - \sqrt{\pi} \cdot H\left(\frac{1}{v_1}\right) \right]^2} \left[ \frac{\sqrt{\pi}}{2} \cdot H\left(\frac{1}{v}\right) \left( \frac{2n^2-2}{v^2} + n^2 - 3 \right) + \frac{1-n^2}{v^2} + 1 \right], \quad (5)$$

где  $H(b) = b \operatorname{erfc}(b) \exp(b^2) = b[1 - \operatorname{erf}(b)] \exp(b^2)$  — дополнительный интеграл вероятностей

[16];  $v = \left( \frac{2\pi m \zeta^2}{1+m} \right)^{1/2} = \left( \frac{2\pi G_2 \zeta^2}{G_1 + G_2^*} \right)^{1/2}$  — обобщенный показатель инерционного приема, зависящий от постоянной времени входной цепи и шумов первого каскада усиления,  $\zeta = T/\tau$  —

параметр инерционности входной цепи,  $\tau$  — длительность сигнала;  $v_1 = vn \sqrt{\frac{2}{1+n^2}}$ . (Следует

отметить, что если шумами усилителя можно пренебречь, то будет реализован безынерционный прием.)

В таблице приведены результаты расчета относительных среднеквадратических погрешностей  $\sqrt{\xi_1}$  и  $\sqrt{\xi_2}$  для рассматриваемых случаев.

Анализ таблицы показывает, что для первого случая среднеквадратическая погрешность фиксации временного положения сигнала в условиях инерционного приема, например при расширении полосы пропускания приемно-усилительного тракта в 5 раз, увеличивается в 2,5 раза при низкой инерционности ( $v = 0,5$ ) и только в 2 раза — при высокой ( $v = 20$ ). Относительное уменьшение погрешности с ростом инерционности при расширении полосы пропускания в этом случае объясняется преобладанием влияния крутизны сигнальной функции на погрешность фиксации сигнала относительно влияния шума.

$n$	$k$	$\nu$	$\sqrt{\xi_1}$	$\sqrt{\xi_2}$	$n$	$k$	$\nu$	$\sqrt{\xi_1}$	$\sqrt{\xi_2}$
1	0,85	0,5	1	1,3520	0,3	0,85	0,5	3,5120	4,7484
		10	1	9,0707			10	1,6436	14,9084
		20	1	17,3824			20	1,4957	25,9991
	0,7	0,5	1	1,6417		0,7	0,5	3,5120	5,7659
		10	1	11,0144			10	1,6436	18,1030
		20	1	21,1072			20	1,4957	31,5703
	0,55	0,5	1	2,0895		0,55	0,5	3,5120	7,3384
		10	1	14,0183			10	1,6436	23,0402
		20	1	26,8637			20	1,4957	40,1804
	0,1	0,5	1	11,4922		0,1	0,5	3,5120	40,3610
		10	1	77,1009			10	1,6436	126,7212
		20	1	147,7503			20	1,4957	220,9920
0,5	0,85	0,5	1,5483	2,0934	0,2	0,85	0,5	8,1355	10,9994
		10	1,1920	10,8126			10	2,3385	21,2166
		20	1,1560	20,0948			20	1,9641	34,1415
	0,7	0,5	1,5483	2,5420		0,7	0,5	8,1355	13,3565
		10	1,1920	13,1296			10	2,3385	25,7569
		20	1,1560	24,4009			20	1,9641	41,4576
	0,55	0,5	1,5483	3,2352		0,55	0,5	8,1355	16,9991
		10	1,1920	16,7104			10	2,3385	32,7815
		20	1,1560	31,0557			20	1,9641	52,7642
	0,1	0,5	1,5483	17,7937		0,1	0,5	8,1355	93,4952
		10	1,1920	91,9070			10	2,3385	180,2985
		20	1,1560	170,8062			20	1,9641	290,2030

Для второго случая, при котором рассматривается погрешность фиксации сигнала при расширении полосы пропускания в условиях инерционного приема по отношению к безынерционному (согласованный фильтр при равномерном энергетическом спектре шума), учитывается коэффициент энергетических потерь. Естественно, в этом случае с ростом инерционности увеличивается и погрешность фиксации сигнала. При этом расширение полосы пропускания в 5 раз приводит к увеличению погрешности более чем в 8 раз при низкой инерционности и в 17 раз — при высокой. С учетом энергетических потерь эта относительная погрешность возрастает существенно. Следует отметить, что и в первом случае необходимо учитывать энергетические потери.

Для обеспечения требуемой точности измерений в обоих случаях потребуется и значительное увеличение мощности излучения.

Проведенный анализ оценки погрешности измерения наклонной дальности при сложной структуре подстилающей поверхности в условиях инерционного приема показал необходимость существенного увеличения требуемой энергии излучения по отношению к случаю, когда имеется только отражение от цели.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Jinliang Yang, Xingshu Wang, Yang Gao. Accuracy study of time delay estimation techniques in laser pulse ranger // Intern. Conf. on Optical Instruments and Technology: Optoelectronic Measurement Technology and Systems: Proc. of SPIE. 2013. Vol. 9046, 90461D. DOI: 10.1117/12.2038131.
2. Koshelev A. V., Lesnykh I. V., Seredovich V. A., Sinjakin A. K., Karpik A. P. High precision pulsing laser ranger // 7th Intern. Symp. on Laser Metrology Applied to Science, Industry, and Everyday Life: Proc. of SPIE. 2002. Vol. 4900.
3. Fu Rongguo, Sa Chula, Li Mengxi, Guo Yiliang, Cheng Yu, Chang Benkang. The research of the laser facula of laser ranger finder in the far distance // Solid State Lasers XX: Technology and Devices: Proc. of SPIE. 2011. Vol. 7912, 79121Z. DOI: 10.1117/12.873565.

4. *Stratan A., Zorila A., Rusen L., Nemes G.* Measuring effective area of spots from pulsed laser beams // *Opt. Engineering*. 2014. Vol. 53(12), 122513.
5. *Wang Zhen, Lv Xin-yuan, Mao Jin-jin, Liu Wei, Yang Dong.* Method of high precision interval measurement in pulse laser ranging system // *Intern. Symp. on Photoelectronic Detection and Imaging; Laser Sensing and Imaging and Applications: Proc. of SPIE*. 2013. Vol. 8905. DOI: 10.1117/12.2033725.
6. *Ruiqiang Chen, Yuesong Jiang.* Measurement method of time-of-flight in pulsed laser ranging // *Intern. Symp. on Optoelectronic Technology and Application, Laser and Optical Measurement Technology and Fiber Optic Sensors: Proc. of SPIE*. 2014. Vol. 9297. DOI: 10.1117/12.2068379.
7. *Munteanu I., MicIo S.* Portable laser rangefinder short pulses measurements // *Advanced Topics in Optoelectronics, Microelectronics, and Nanotechnologies: Proc. of SPIE*. 2003. Vol. 5227. P 452—455.
8. *Amann M-C., Bosch T., Lescure M., Myllyla R., Rioux M.* Laser ranging a critical review of usual techniques for distance measurement // *Opt. Engineering*. 2001. Vol. 40, N 1. P 10—18.
9. *Jutzi B., Eberle B., Stilla U.* Estimation and measurement of backscattered signals from pulsed laser radar // *Image and Signal Processing for Remote Sensing VIII: Proc. of SPIE*. 2003. Vol. 4885.
10. *Ле В. Д., Лебедько Е. Г.* Анализ отражательных характеристик подстилающей поверхности при измерении наклонной дальности // *Изв. вузов. Приборостроение*. 2016. Т. 59, № 7. С. 571—577.
11. *Ле В. Д.* Дисперсия оценки времени запаздывания сигнала при измерении наклонной дальности // *Сб. тр. V Всерос. конгресса молодых ученых*. 2016. Т. 1. С. 296—297.
12. *Лебедько Е. Г., Порфирьев Л. Ф., Хайтун Ф. И.* Теория и расчет импульсных и цифровых оптико-электронных систем. Л.: Машиностроение, 1984. 192 с.
13. *Фалькович С. Е.* Оценка параметров сигналов. М.: Сов радио, 1970. 334 с.
14. *Лебедько Е. Г.* Системы импульсной оптической локации. СПб: Изд-во „Лань“, 2014. 357 с.
15. *Лебедько Е. Г.* Оценка параметров сигналов в оптико-электронных приборах: Учеб. пособие. СПб: СПбГУ ИТМО, 2001. 39 с.
16. *Справочник по специальным функциям / Под ред. М. Абрамовица, И. Стиган; Пер. с англ.* М.: Наука, 1979. 548 с.

#### Сведения об авторах

- Ле Ву Дин** — аспирант; Университет ИТМО; кафедра оптико-электронных приборов и систем; E-mail: ldvu81@rambler.ru
- Евгений Георгиевич Лебедько** — д-р техн. наук, профессор; Университет ИТМО; кафедра оптико-электронных приборов и систем; E-mail: eleb@rambler.ru
- Нгуен Тунг Дык** — аспирант; Университет ИТМО; кафедра оптико-электронных приборов и систем; E-mail: tungduc88@gmail.com
- Лю Лу** — аспирант; Университет ИТМО; кафедра оптико-электронных приборов и систем; E-mail: shenxiaoqianqiu@gmail.com

Рекомендована кафедрой  
оптико-электронных приборов и систем

Поступила в редакцию  
20.03.17 г.

**Ссылка для цитирования:** *Ле Ву Дин, Лебедько Е. Г., Нгуен Тунг Дык, Лю Лу.* Потенциальная точность измерения наклонной дальности с учетом инерционности входной цепи приемной системы // *Изв. вузов. Приборостроение*. 2017. Т. 60, № 7. С. 654—659.

#### POTENTIAL ACCURACY OF SLANT RANGE MEASUREMENT WITH THE INERTIAL INPUT CIRCUIT OF RECEIVING SYSTEM

Le Vu Dinh, E. G. Lebedko, Nguyen Tung Duc, Liu Lu

ITMO University, 197101, St. Petersburg, Russia  
E-mail: ldvu81@rambler.ru

Potential accuracy of slant range measurement for ground objects at the complex structure of the underlying surface is estimated with the account for inertial receiver and the amplifier circuit noise. Effec-

tiveness of the receiver-amplifier path bandwidth expansion is analyzed as a mean to avoid superposition of signals from a local object with returns from the underlying surface. An estimate of energy loss and an accuracy assessment are presented.

**Keywords:** estimate of time delay variance, slant range, nonstationary illumination, sounding signal, inertial circuit input, delay time

**Data on authors**

- |                          |   |  |
|--------------------------|---|--|
| <b>Le Vu Dinh</b>        | — | Post-Graduate Student; ITMO University, Department of Optical-Electronic Devices and Systems; E-mail: ldvu81@rambler.ru        |
| <b>Evgeny G. Lebedko</b> | — | Dr. Sci., Professor; ITMO University, Department of Optical-Electronic Devices and Systems; E-mail: eleb@rambler.ru            |
| <b>Nguyen Tung Duc</b>   | — | Post-Graduate Student; ITMO University, Department of Optical-Electronic Devices and Systems; E-mail: tungduc88@gmail.com      |
| <b>Liu Lu</b>            | — | Post-Graduate Student; ITMO University, Department of Optical-Electronic Devices and Systems; E-mail: shenxiaqianqiu@gmail.com |

**For citation:** Le Vu Dinh, Lebedko E. G, Nguyen Tung Duc, Liu Lu. Potential accuracy of slant range measurement with the inertial input circuit of receiving system. *Journal of Instrument Engineering*. 2017. Vol. 60, N 7. P. 654—659 (in Russian).

DOI: 10.17586/0021-3454-2017-60-7-654-659