

ОЦЕНКА ТОЧНОСТИ ИЗМЕРЕНИЯ ДАЛЬНОСТИ ЛАЗЕРНЫМ ЛОКАТОРОМ ПРИ СЛУЧАЙНЫХ ОШИБКАХ НАВЕДЕНИЯ ЛАЗЕРНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ НА ОБЪЕКТ

В.В. Пономарев, д.т.н. Г.Н. Доля, к.т.н. А.М. Резниченко, С.В. Косенко

Получено выражение для дисперсии ошибок измерения дальности лазерным локатором в условиях сильных флуктуаций амплитуды принимаемого сигнала, вызванных случайными ошибками наведения оптической оси лазерного передатчика на объект.

При решении ряда практических задач, связанных с получением и обработкой локационной информации о космических аппаратах (КА) квантово-оптическими системами (КОС), возникает актуальная задача измерения наклонной дальности со среднеквадратической ошибкой, составляющей единицы сантиметров [1].

В импульсных системах измерения дальности (СИД) осуществляется измерение временного интервала (пропорционального значению дальности) между моментом излучения и моментом фиксации отраженного импульса лазерного излучения.

При лоцировании высокоорбитальных КА, снабженных уголковыми отражателями, уровень принимаемого сигнала часто оказывается близким к пороговому. В этом случае огибающая импульса излучения не воспроизводится, а на интервале, равном длительности импульса излучения, наблюдается некоторое число импульсов от отдельных фотоэлектронов сигнала и помехи. Тогда для оптимального приемника, работающего в режиме счета фотонов, дисперсия ошибки измерения временного интервала определяется соотношением [2]:

$$\sigma_{\tau}^2 = \frac{\tau_{\Pi}}{\Delta f} \left[\frac{1 + (1 + \bar{N}_c / \bar{N}_{\Pi})^2}{4(\bar{N}_c / \bar{N}_{\Pi})^2} + \frac{\bar{N}_c + 2\bar{N}_{\Pi}}{4\bar{N}_c^2} \right], \quad (1)$$

где τ_{Π} - длительность зондирующего импульса; Δf - полоса пропускания измерительного тракта; \bar{N}_c - среднее число сигнальных фотоэлектронов; \bar{N}_{Π} - среднее число помеховых фотоэлектронов.

Как видно из соотношения (1), дисперсия измерения временного интервала σ_{τ}^2 не равна нулю при полном отсутствии помехи, т.е. при бесконечно большом в классическом смысле отношении сигнал-помеха.

В реально работающих КОС (например, КОС “Сажень-С”) точность измерения дальности в реальных условиях ее функционирования оказывается существенно ниже, чем потенциально возможная. Такое снижение потенциальной точности измерения вызвано, на наш взгляд, влиянием среды распространения (турбулентности атмосферы) на пространственные характеристики лазерного излучения, которое приводит к флуктуациям интенсивности принимаемого излучения и, как следствие, к изменению отношения сигнал-помеха.

Введем величину $Q(\rho)$, которая пропорциональна уровню отраженного сигнала при отклонении луча подсвета, эффективный размер поперечного сечения которого в плоскости цели равен a , относительно малоразмерной апертуры блока уголкового отражателя КА, на случайную величину ρ , характеризующую ошибку наведения.

Выражение для $Q(\rho)$ можно получить из предположения, что зондирующий луч имеет гауссово распределение силы света по сечению [3]:

$$Q(\rho) = 2\pi U_0 \int_0^{r_0} \exp\left[-\frac{r^2 + \rho^2}{a^2}\right] I_0\left(\frac{2\rho r}{a^2}\right) r dr,$$

где U_0 - сила света на оси излучаемого луча; r_0 - радиус апертуры блока уголкового отражателя КА.

В случае нормальных флуктуаций по азимуту и углу места с нулевым средним и дисперсией σ_ρ^2 (что характерно для турбулентной атмосферы) величина Q имеет следующее распределение плотности вероятности [3]:

$$f(Q) = \frac{a^2}{2\sigma_\rho^2} \exp\left(-\frac{\gamma^2}{2\sigma_\rho^2}\right) I_0\left(\gamma \frac{\sqrt{\ln Q_{\max}/Q}}{\sigma_\rho}\right) Q^{\frac{a^2}{2\sigma_\rho^2}-1} Q_{\max}^{-\frac{a^2}{2\sigma_\rho^2}},$$

где γ - угловое рассогласование между полями излучения и приема; $I_0(z)$ - модифицированная функция Бесселя; Q_{\max} - величина, характеризующая максимальную величину уровня отраженного сигнала ($\rho = 0$).

Для уголкового отражателя $Q_{\max} = U_0$.

Предположим, что угловое рассогласование между полями излучения и приема равно нулю (при использовании одной апертуры на прием и передачу). Тогда выражение для плотности вероятности величины Q примет вид

$$f(Q) = \frac{1}{2\chi^2} Q^{\frac{1}{2\chi^2}-1} U_0 \frac{1}{2\chi^2},$$

где $\chi = \frac{\sigma_p}{a}$ - величина среднеквадратической ошибки наведения лазерного излучения на объект, нормированная на размер пятна подсвета в плоскости цели.

Найдем среднее значение и дисперсию величины уровня отраженного сигнала:

$$\bar{Q}(\chi) = \frac{U_0}{1+2\chi^2};$$

$$\sigma_Q^2(\chi) = \frac{4\chi^4 U_0^2}{(1+4\chi^2)(1+2\chi^2)^2}.$$

Тогда выражение для относительных флуктуаций уровня отраженного сигнала примет вид

$$\frac{\sigma_Q(\chi)}{\bar{Q}(\chi)} = \frac{2\chi^2}{\sqrt{1+4\chi^2}}.$$

На рис. 1 представлена зависимость $\frac{\sigma_Q(\chi)}{\bar{Q}(\chi)}$ от величины χ . Как

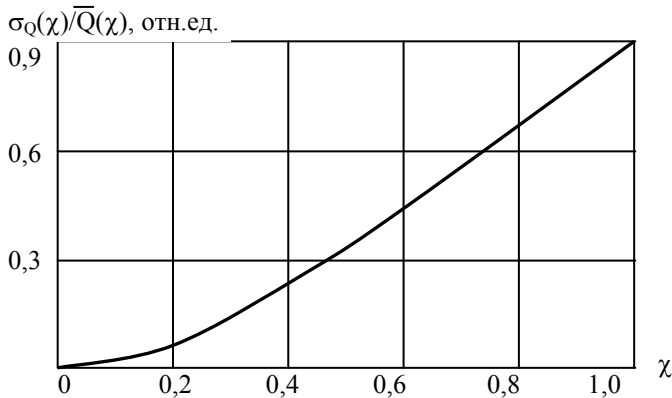


Рис.1. Зависимость относительных флуктуаций уровня отраженного сигнала от величины χ

видно из графика при ошибках наведения, сопоставимых с размером пятна подсвета, флуктуации уровня отраженного сигнала сравнимы с его средним значением.

Обозначим отношение среднего значения уровня отраженного сигнала $\overline{Q}(\chi)$ к его максимальному значению (для уголкового отражателя $Q_{\max} = U_0$) через $q(\chi)$, которое характеризует снижение уровня отраженного сигнала за счет случайных ошибок наведения

$$q(\chi) = \frac{1}{1 + 2\chi^2}. \quad (2)$$

Из уравнения оптической локации [2] и с учетом (2) получим выражения для числа сигнальных фотоэлектронов

$$\overline{N}_c = \frac{\lambda}{hc} \frac{\eta \tau_1 \tau_2 D^2 S_k \rho_k \tau_R^2 W_{лк}(\psi_{аб})}{4\pi \theta_1^2 \theta_k^2 L^4} \cdot q(\chi), \quad (3)$$

где λ - длина волны излучения; h - постоянная Планка; c - скорость света; D - диаметр приемного телескопа; τ_1, τ_2 - коэффициенты пропускания передающего и приемного трактов соответственно; τ_R - прозрачность среды от передающего телескопа до объекта; η - квантовый выход приемника излучения; S_k - суммарная площадь уголкового отражателей; ρ_k - коэффициент отражения катафота; θ_1 - половинный угол расходимости лазерного излучения (диаграмма направленности лазерного локаатора); θ_k - диаграмма направленности отраженного катафотом излучения; L - дальность до КА; $W_{лк}$ - энергия излучения; $k(\psi_{аб})$ - коэффициент, учитывающий уменьшение уровня принимаемого сигнала вследствие скоростной аберрации (для высокоорбитальных космических аппаратов $k(\psi_{аб}) \approx 1$).

Подставив выражение (3) в (1), получим зависимость дисперсии ошибки измерения временного интервала от нормированной на размер пятна подсвета ошибки наведения.

На рис. 2 представлена зависимость среднеквадратической ошибки измерения дальности $\sigma_l = \sigma_c$ (c - скорость света) от нормированной на размер пятна подсвета ошибки наведения при начальном отношении сигнал-помеха, равным 10.

При ошибках наведения, сопоставимых с размером пятна подсвета в плоскости цели, среднеквадратическая ошибка измерения дальности до КА при малых отношениях сигнал – шум может увеличиться в 1,8 раза по сравнению с отсутствием ошибок наведения. На основании полученных оценок возникает актуальная задача компенсации случайных

ошибок наведения, дающая возможность достижения потенциальной точности измерения наклонной дальности до КА.

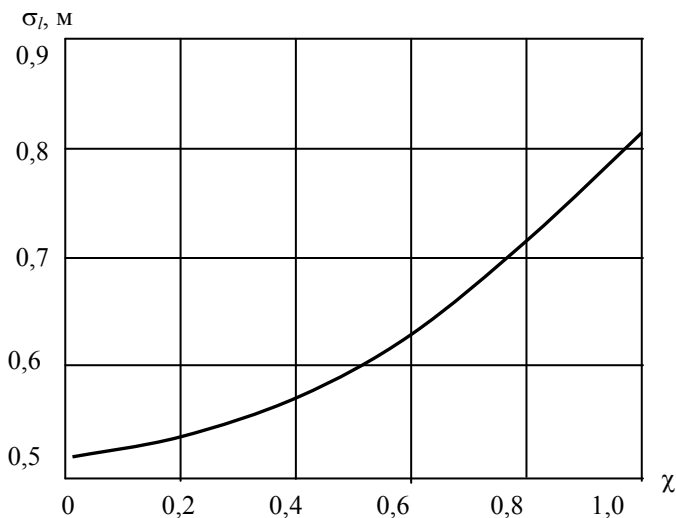


Рис.2. Зависимость σ_l от χ при начальном отношении сигнал – помеха, равным 10

Полученные выражения можно использовать для количественных оценок точности измерения дальности лазерных локоаторов.

ЛИТЕРАТУРА

1. Лазерная дальнометрия / Л.А. Аснис, В.П.Васильев, В.Б. Волконский и др. / Под ред. В.П. Васильева и Х.В. Хинрикус. – М.: Радио и связь, 1995. – 256 с.
2. Лазерные измерительные системы / А.С. Батраков, М.М. Бутусов, Г.П. Гручка и др / Под ред. Д.П. Лукьянова. – М.: Радио и связь, 1981. – 456 с.
3. Плешенов Ю.В., Самойлов В.Д. Амплитудная ошибка импульсного светодальномера при флуктуациях сигнала // Оптико-механическая промышленность. – 1979. – № 3. – С. 9 - 11.

Поступила в редколлегию 23.08.2000