

АППАРАТУРА ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЙ И МЕТОДЫ ИЗМЕРЕНИЙ

УДК 621.396.967.029.7

И.В. Знаменский, А.А. Тихомиров

ОПТИМИЗАЦИЯ И РАСЧЕТ ПАРАМЕТРОВ ЛАЗЕРНОГО ВЫСОТОМЕРА ПРИ НЕКОГЕРЕНТНОМ ПРИЕМЕ

Предложена графоаналитическая методика расчета параметров импульсного лазерного высотомера при некогерентном приеме. Получено выражение для отношения сигнал-шум на выходе фотодетектора, с помощью которого по заданной вероятности ложной тревоги и тактико-техническим характеристикам проектируемого высотомера определяется вероятность правильного обнаружения сигнала. При этом оптимизируется значение интервала наблюдения с целью максимизации вероятности правильного обнаружения сигнала и выбирается величина порога. Установлена нечувствительность схемы последетекторной обработки к полуторакратному относительному изменению интервала наблюдения. Оценена погрешность измерения дальности по интервалу между фронтами зондирующего и отраженного импульсов. Проведено сравнение потенциальной точности измерения дальности для различных схем последетекторной обработки. Найден критический угол наклона подстилающей поверхности, при котором уровень мощности принимаемого сигнала на входе фотодетектора равен пороговой.

Применение лазерной локационной системы вместо радиолокационной на борту космического аппарата позволяет существенно повысить точность определения параметров орбиты за счет сужения диаграммы направленности и сокращения длительности излучаемых импульсов. При этом энергетические характеристики существующих импульсных лазеров обеспечивают некогерентный прием отраженного от подстилающей поверхности (ПП) сигнала с использованием фотоэлектронов большим 10 плотность вероятности их количества аппроксимируется в выходной цепи ФЭУ, когда мгновенное значение напряжения превышает заданную величину порогового уровня. При среднем числе одновременно регистрируемых на интервале наблюдения τ фотоэлектронов большим 10 плотность вероятности их количества аппроксимируется гауссовской функцией [1]. В дальнейшем будем полагать, что это условие выполняется как для сигнала, так и для смеси сигнала и шума, однако для статистики только шумовых фотоэлектронов это допущение будет приводить к завышению величины порога.

Задача оптимизации обработки оптических сигналов при некогерентном детектировании по критерию максимума отношения сигнал-шум рассмотрена в работе [2]. Однако, как показано в [1], в области малых шумов этот критерий не всегда приемлем для оценки эффективности локационной системы, так как характеристики обнаружения оптического сигнала зависят от абсолютных значений средних уровней оптического сигнала и шума.

В данной работе проводится оптимизация параметров лазерного спутникового высотомера, использующего прямое детектирование оптического сигнала и последетекторный фильтр с амплитудно-частотной характеристикой вида $[\sin(\omega\tau/2)]/(\omega\tau/2)$, где τ — оптимизируемый интервал наблюдения (длительность импульсной характеристики фильтра), с применением процедуры обнаружения по критерию Неймана-Пирсона. Будем полагать, что огибающая отраженного от ПП сигнала имеет вид гауссовой кривой [3, 4].

$$P_c(t) = P_{c0} \exp(-2t^2/\tau_{c0}^2), \quad (1)$$

где P_{c0} — пиковое значение мощности принимаемого сигнала; τ_{c0} — его длительность по уровню максимальной крутизны, т. е. по уровню 0,607. Рассматривая в дальнейшем не только аналоговый режим работы ФЭУ, но и режим накопления заряда за интервал наблюдения [5], представим среднее число сигнальных фотоэлектронов как

$$N_c = \sqrt{2\pi} P_{c0} \tau_{c0} \varepsilon [\Phi(z) - 0,5] / h\nu, \quad (2)$$

где ε — квантовая эффективность ФЭУ; $\Phi(z) = (2\pi)^{-1/2} \int_{-\infty}^z \exp(-x^2/2) dx$ — интеграл вероятности;

$y = \tau/\tau_{c0}$ — нормированный интервал наблюдения.

Превышение порогового числа фотоэлектронов $N_{\text{пор}}$ над средним числом шумовых фотоэлектронов $N_{\text{ш}}$ на интервале наблюдения с учетом выражений (1) и (2) имеет вид

$$n_{\text{пор.с}} = N_{\text{пор}} - N_{\text{ш}} = N_c f_1, \quad (3)$$

где $f_1 = [\tau \exp(-T_{\text{пор}}^2 / 2\tau_{\text{с0}}^2)] / \sqrt{2\pi}\tau_{\text{с0}}[\Phi(z) - 0,5]$, $T_{\text{пор}}$ — длительность сигнала по выбранному уровню порога. Здесь и далее мы пренебрегаем темновыми токами ФЭУ. На рис. 1 представлены мощности сигнала и шума, а также уровень пороговой мощности, соответствующий напряжению порога при последетекторной обработке.

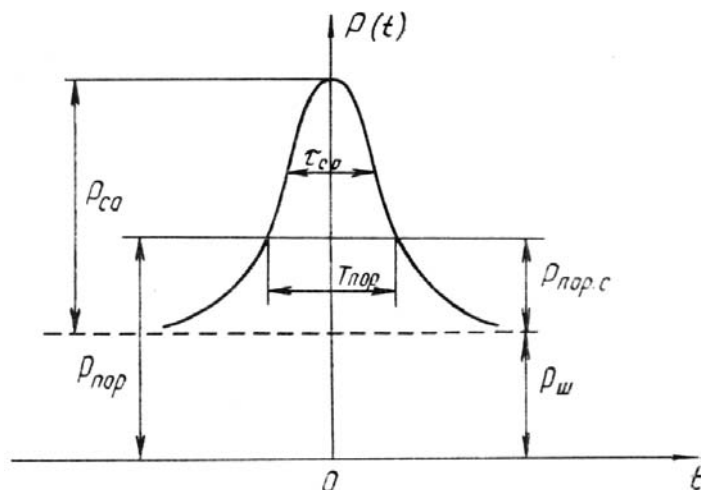


Рис. 1. Форма рассматриваемых оптических сигналов, обозначения приведены в тексте

При лоцировании ПП в надир с максимальной высоты орбиты H_{max} минимальное значение мощности принимаемого отраженного от ПП сигнала на фотокатоде ФЭУ равно

$$P_{\text{с } 0} = A E S_a, \quad (4)$$

где E — энергия передатчика; S_a — площадь приемной антенны; A — коэффициент, который для ламбертовской поверхности определяется из выражения $A = \sqrt{2}\rho_{\text{min}}K_{\text{пр}}\tau_{\text{ат}}^2\pi^{3/2}H_{\text{max}}^2\tau_{\text{с0}}^2$. Здесь ρ_{min} — наименьшее альbedo ПП; $K_{\text{пр}}$ — коэффициент пропускания приемного оптического тракта; $\tau_{\text{ат}}$ — коэффициент пропускания атмосферы.

Максимальное значение суммарной мощности помехи (шума) на фотокатоде ФЭУ, обусловленной обратным рассеянием от атмосферы и внешним фоновым излучением равно

$$P_{\text{ш}} = S_a(BE + \eta\Omega_{\text{пр}}), \quad (5)$$

где в приближении однократного рассеяния $B = cK_{\text{пр}}\beta_{\pi}\tau_{\text{ат}}^2 / 2H_{\text{min}}$ (здесь c — скорость света; β_{π} — коэффициент обратного рассеяния атмосферы около ПП; H_{min} — минимальное расстояние до ПП); $\Omega_{\text{пр}}$ — телесный угол поля зрения приемной антенны; $\eta = N_{\lambda}\Delta\lambda K_{\text{пр}}K(\varphi, \rho, \sigma_{\text{осл}})$ — коэффициент, характеризующий уровень внешнего фона (здесь N_{λ} — спектральная плотность мощности солнечной засветки на границе атмосферы; $\Delta\lambda$ — ширина полосы оптического фильтра; $K(\varphi, \rho, \sigma_{\text{осл}})$ — коэффициент, зависящий от угла расположения Солнца, относительно надира φ , альbedo ПП ρ и коэффициента ослабления в атмосфере $\sigma_{\text{осл}}$).

Если статистика шума и смеси сигнала с шумом гауссова, то вероятность ложной тревоги $P_{\text{л.т}}$ и вероятность правильного обнаружения сигнала $P_{\text{п.о}}$ на интервале наблюдения имеют вид [1, 4, 7]

$$P_{\text{л.т}} = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_{\text{ш}}} \int_{N_{\text{пор}}}^{\infty} \exp\{(N - N_{\text{ш}})^2 / 2\sigma_{\text{ш}}^2\} dN = 1 - \Phi(U_1); \quad (6)$$

$$P_{\text{п.о}} = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_{\Sigma}} \int_{N_{\text{пор}}}^{\infty} \exp\{[N - (N_c + N_{\text{ш}})]^2 / 2\sigma_{\Sigma}^2\} dN = \Phi(U_2), \quad (7)$$

где аргументы интеграла вероятности $\Phi(U)$ равны

$$U_1 = (N_{\text{пор}} - N_{\text{ш}})/\sigma_{\text{ш}} = n_{\text{пор.с}}/\sqrt{FN_{\text{ш}}}; \quad (8)$$

$$U_2 = (N_c + N_{\text{ш}} - N_{\text{пор}})/\sigma_{\Sigma} = (N_c - n_{\text{пор.с}})/\sqrt{F(N_c + N_{\text{ш}})}, \quad (9)$$

$\sigma_{\text{ш}}^2 = FN_{\text{ш}}$, $\sigma_{\Sigma}^2 = F(N_c + N_{\text{ш}})$ – дисперсии числа фотоэлектронов, связанных с внешним шумом (помехой) и со смесью сигнала и помехи соответственно; F – коэффициент шума ФЭУ. Используя выражения (8) и (9) с учетом (3), найдем N_c .

$$N_c = F \left\{ \frac{(1 - f_1)^2}{[\Phi^{-1}(P_{\text{н.о}})]^2} - \frac{f_1^2}{[\Phi^{-1}(1 - P_{\text{л.т}})]^2} \right\}^{-1}. \quad (10)$$

Относительный уровень порога по мощности $f_0 = P_{\text{пор.с}}/P_{\text{с0}}$ может быть получен из (1) с учетом (8), (4) и (5)

$$f_0 = \frac{\Phi^{-1}(1 - P_{\text{л.т}})}{AE} \sqrt{\frac{(\gamma_1 \Omega_{\text{пр}} + BE) F h \nu}{\varepsilon \tau S_a}}. \quad (11)$$

Величина $\Phi^{-1}(P_{\text{н.о}})$ определяется из выражения (10) с учетом выражений для f_0 и (11). После преобразований получим

$$\Phi^{-1}(P_{\text{н.о}}) = \sqrt{\frac{V 2\pi AS_a E \tau_{\text{с0}}^2 \varepsilon}{F h \nu}} \left\{ \frac{\Phi(z) - M \sqrt{z} - 0,5}{\sqrt{\Phi(z) + \frac{(\gamma_1 \Omega_{\text{пр}} + BE) z}{V z \pi AE} - 0,5}} \right\}, \quad (12)$$

где

$$M = \frac{\Phi^{-1}(1 - P_{\text{л.т}})}{AE} \sqrt{\frac{(\gamma_1 \Omega_{\text{пр}} + BE) F h \nu}{2\pi \varepsilon S_a \tau_{\text{с0}}}}. \quad (13)$$

В выражении (12) $AE/(\gamma_1 \Omega_{\text{пр}} + BE) = q^2$ есть отношение сигнал-шум по мощности на входе фотодетектора. Его максимальное значение в отсутствие внешнего фонового излучения ограничено помехой обратного рассеяния и равно $q_{\text{max}}^2 = A/B$. Максимум значения $\Phi^{-1}(P_{\text{н.о}})$, зависящего от z , будем искать как максимум функции y , определяемой выражением в фигурных скобках (12):

$$y = \frac{\Phi(z) - M \sqrt{z} - 0,5}{\sqrt{\Phi(z) + z/\sqrt{2\pi} q^2 - 0,5}}. \quad (14)$$

Для значений $q^2 \gg 1$ и $z \leq .3$ можно принять

$$z \ll \sqrt{2\pi} q^2 [\Phi(z) - 0,5]. \quad (15)$$

Решение уравнения (14), выполненное численным методом при условии (15), приведено на рис. 2. Из него видно, что максимум y нерезко выражен и при уменьшении M смещается вправо, а значение максимума y растет. Следует заметить, что значению $M = 0$ соответствует вероятность правильного обнаружения сигнала $P_{\text{н.о}} = 0,5$.

На рис. 3 представлены графики зависимостей $z_{\text{опт}}$ от M и q^2 . Для значений $q^2 \geq 100$ кривые сливаются в одну. На рис. 4 приведены зависимости y_{max} от M при различных q^2 . При отрицательных значениях y_{max} вероятности правильного обнаружения сигнала $P_{\text{н.о}} < 0,5$. Уменьшение M приводит к увеличению значения $P_{\text{н.о}}$. Таким образом при расчете параметров высотомера для заданных значений M и q^2 можно по рис. 3 найти $z_{\text{опт}}$, а, используя рис. 4, найти y_{max} .

Определение величины $z_{\text{опт}}$ позволяет оптимизировать ширину полосы пропускания электрического фильтра на выходе фотодетектора [1, 6]. Зная $z_{\text{опт}}$, можно найти характеристики обнаружения по критерию Неймана-Пирсона, т.е. для заданной вероятности ложной тревоги $P_{\text{л.т}}$ или для заданной $\Phi^{-1}(1 - P_{\text{л.т}})$ найти максимальное значение вероятности правильного обнаружения сигнала $P_{\text{н.о}}$ или $\Phi^{-1}(P_{\text{н.о}})$.

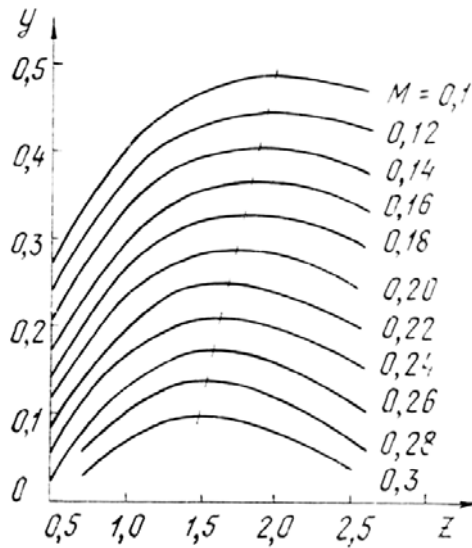


Рис. 2. Зависимость функции y (14) от нормированного интервала наблюдения z для различных значений параметра M при отношении сигнал-шум $q^2 \geq 100$

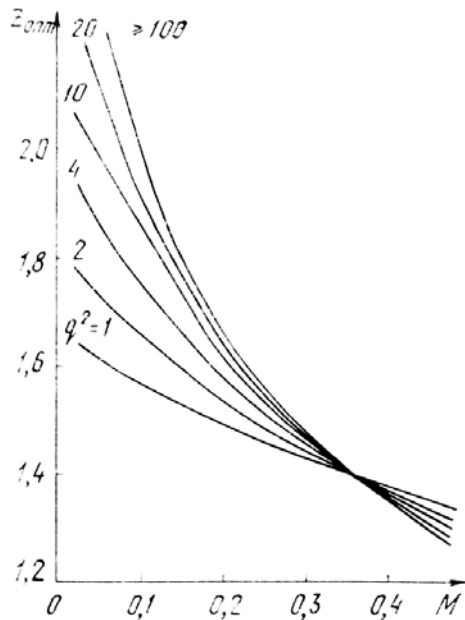


Рис. 3. Зависимость величины оптимального интервала наблюдения $z_{\text{опт}}$ от параметра M при различных значениях отношения сигнал-шум

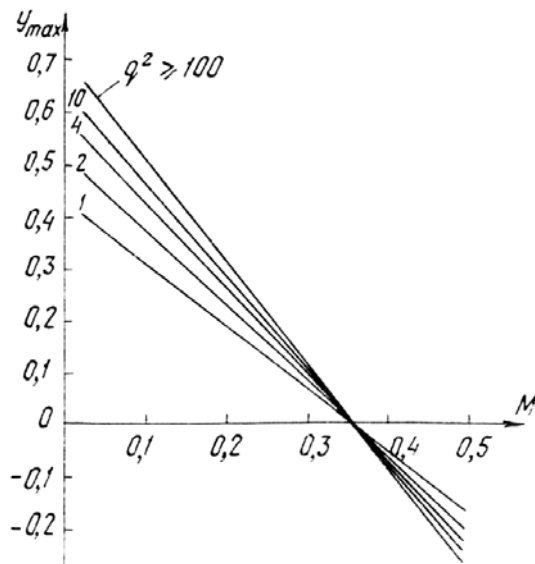


Рис. 4. Зависимость y_{max} от M при различных значениях отношения сигнал-шум

С учетом (4) и (14) представим выражения (12) и (13) в следующем виде:

$$\Phi^{-1}(P_{\text{п.о}}) = y \sqrt{2E_{\text{с0}} \varepsilon / Fh\nu}; \quad (16)$$

$$M = \Phi^{-1}(1 - P_{\text{л.т}}) \sqrt{Fh\nu / \sqrt{8\pi} E_{\text{с0}} q^2 \varepsilon}, \quad (17)$$

Где $E_{\text{с0}} = \sqrt{\pi / 2} P_{\text{с0}} \tau_{\text{с0}}$ — полная энергия принятого сигнала на входе фотодетектора. Как видно из (16) и (17), значение вероятности правильного обнаружения сигнала $P_{\text{п.о}}$ зависит от полной энергии сигнала $E_{\text{с0}}$, квантовой эффективности и коэффициента шума ФЭУ, а также от отношения сигнал-шум и вероятности ложной тревоги через y . Таким образом, соотношения (16) и (17) в совокупности с графиками, приведенными на рис. 3 и 4, позволяют рассчитать вероятность правильного обнаружения сигнала и выбрать постоянную времени $z_{\text{опт}}$ фильтра на выходе ФЭУ.

Определим теперь величину порога, обеспечивающего заданную вероятность ложной тревоги. Пороговое значение мощности сигнала на входе фотодетектора равно $P_{\text{пор.с}} = P_{\text{с0}}f_0$, где относительный уровень порога, определяемый (11), с учетом (13) равен

$$f_0 = M \sqrt{2\pi/z_{\text{опт}}}. \quad (18)$$

Пороговое число фотоэлектронов $N_{\text{пор}}$ на интервале наблюдения $z_{\text{опт}}$ определяется в виде $N_{\text{пор}} = N_{\text{ш}} + N_c f_1$ где

$$f_1 = M \sqrt{z_{\text{опт}}/[\Phi(z_{\text{опт}}) - 0,5]}. \quad (19)$$

Выше были рассмотрены характеристики обнаружения сигнала, сформированного ПП, перпендикулярной направлению зондирования. С увеличением угла наклона ПП вероятность правильного обнаружения сигнала будет уменьшаться, так как пропорционально косинусу угла наклона будет уменьшаться энергия принимаемого сигнала. Отношение мощностей принимаемых сигналов от нормальной $P_{\text{с0}}$ и наклонной $P_{\text{с}\alpha}$ поверхностей равно

$$P_{\text{с0}}/P_{\text{с}\alpha} = m/\cos\alpha, \quad (20)$$

где $m = \tau_\alpha/\tau_0$ коэффициент увеличения длительности сигнала, принимаемого от наклонной поверхности.

Значение критического угла наклона ПП, при котором амплитуда мощности принимаемого сигнала на входе фотодетектора равна пороговой, т.е. $P_{\text{с}\alpha} = P_{\text{пор}}$, определяется выражением

$$\alpha_{\text{кр}} = \arcsin \sqrt{(1 - f_0^2)/(1 + f_0^2 G_1^2)}. \quad (21)$$

где $G_1 = (2\sqrt{2}H\Theta_0)/\tau_{\text{л}}$; H – высота дальномера над ПП; Θ_0 – плоский угол расходимости излучения лазерного передатчика по уровню 0,5; $\tau_{\text{л}}$ – длительность излучаемого импульса по уровню 0,5. Критическое значение коэффициента увеличения длительности сигнала можно представить как

$$m_{\text{кр}} = (\cos\alpha_{\text{кр}})/f_0. \quad (22)$$

Проведем теперь оценку точности измерения дальности. Флуктуационная составляющая среднеквадратической ошибки σ_τ измерения дальности для случая измерения между фронтами зондирующего и отраженного импульса и для максимальной мощности принятого сигнала равна

$$\sigma_\tau = \frac{0,36\tau_{\text{с0}}}{f_0 \sqrt{(N_c/F) \ln(1/f_0)}}. \quad (23)$$

Результаты сравнения потенциальной точности измерения дальности для различных схем последетекторной обработки при $\tau_{\text{ш}} = 10$ нс, $N_c = 16$, $f_0 = 0,607$, $F = 1$ приведены в табл. 1, где $\tau_{\text{ш}}$ – длительность импульса принимаемого сигнала по уровню 0,5.

На вероятности правильного обнаружения сигнала сказывается также неоптимальная временная обработка, т. е. ширина полосы последетекторного фильтра. При относительной расстройке $\Delta = (z - z_{\text{опт}})/z_{\text{опт}}$ происходит уменьшение величины y (см. рис. 2), а следовательно, уменьшается вероятность правильного обнаружения сигнала. Относительное уменьшение величины y оценим с помощью коэффициента $\delta = (y_{\text{max}} - y)/y_{\text{max}}$, а максимальную вероятность правильного обнаружения сигнала $P_{\text{п.о.м}}$, вычисленную для $z = z_{\text{опт}}$, сравним с вероятностью правильного обнаружения $P_{\text{п.о}}$ при расстройке Δ и различных значениях M . Результаты расчетов сведены в табл. 2. При этом было принято $P_{\text{л.т}} = 10^{-6}$, $q^2 = 100$, $\Delta = 1,5$.

Таблица 1

Гауссовская форма сигнала. Режим счёта фотонов [8]	Огибающая сигнала вида $\sin x/x$. Режим восстановления огибающей [9]	Гауссовская форма сигнала. Режим восстановления огибающей
$\sigma_\tau = \frac{\tau_{\text{ш}}}{2,35 \sqrt{N_c}}$	$\sigma_\tau = \frac{\tau_{\text{ш}}}{1,8 \sqrt{N_c}}$	$\sigma_\tau = \frac{0,3\tau_{\text{ш}}}{f_0 \sqrt{(N_c/F) \ln(1/f_0)}}$
1,06 нс	1,38 нс	1,75 нс

Полученные результаты показывают, что относительная расстройка полосы пропускания последетекторного фильтра в 1,5 раза не приводит к существенным изменениям вероятности правильного обнаружения сигнала. Причем с увеличением M , что равносильно уменьшению энергии входного сигнала, влияние расстройки на величину вероятности правильного обнаружения сигнала возрастает.

Таблица 2

y_{\max}	M	δ	$P_{\text{п.о}}$	$P_{\text{п.о.м}}$
0,100	0,30	$4 \cdot 10^{-1}$	0,548	0,579
0,211	0,24	$1,61 \cdot 10^{-1}$	0,671	0,700
0,407	0,14	$7,13 \cdot 10^{-2}$	0,946	0,958
0,484	0,10	$5,7 \cdot 10^{-2}$	0,997	0,998

Предложенная методика может быть полезна для расчета импульсных лазерных высотомеров. Она позволяет определить отношение сигнал-шум на входе фотодетектора и по заданным значениям вероятности ложной тревоги и тактико-техническим характеристикам проектируемого лазерного высотомера рассчитать вероятность правильного обнаружения сигнала. При этом с целью максимизации вероятности правильного обнаружения сигнала оптимизируется интервал наблюдения и выбирается величина порога. Сравнение потенциальной точности измерения дальности для различных схем обработки показало их незначительное отличие.

1. Малашин М.С., Каминский Р.П., Борисов Ю.П. Основы проектирования лазерных локационных систем. М: Высшая школа, 1983. 207 с.
2. Бакут П.А., Логинов В.А., Майстренко Г.И. //Радиотехника и электроника. 1983. Т. 28. № 5. С. 931–942.
3. Горяйнов В.Т., Журавлев А.Г., Тихонов В.И. Примеры и задачи по статистической радиотехнике. М.: Сов. радио, 1970. 600 с.
4. Лебедько Е.Г. //Труды ЛИТМО. 1975. Вып. 81. С. 56–83.
5. Глазов Г.Н. Статистические вопросы лидарного зондирования атмосферы. Новосибирск: Наука, 1987. 311 с.
6. Прайт В.К. Лазерные системы связи //Пер. с англ. под ред. А.Г. Шереметьева. М.: Связь, 1972. 232 с.
7. Сигналы и помехи в лазерной локации //Орлов В.М., Самохвалов И.В., Креков Г.М. и др. /Под ред. В.Е. Зуева. М.: Радио и связь, 1985. 264 с.
8. Воробьев В.И. Оптическая локация для радиоинженеров. М.: Радио и связь, 1983. 176 с.
9. Лазерные измерительные системы //Батраков А.С., Бутусов М.М., Гречка Г.П./Под ред. Д.П. Лукьянова. М.: Радио и связь. 1981. 456 с.

СКБ НИП «Оптика» СО АН СССР,
Томск

Поступила в редакцию
19 декабря 1988 г.

I. V. Znamenskii and A. A. Tihomirov. Optimization and Calculation of the Incoherent Laser Altimeter Parameters.

A semigraphical technique for calculating the incoherent laser altimeter parameters is suggested. The output photodetector signal-to-noise ratio expression has been derived to define the probability of the correct signal detection by using the given false alarm probability and the altimeter technical specifications. Here, the threshold value is chosen and the observation range value is optimized in order to maximize the correct signal detection probability. The relative observation range variation of 1,5 order of magnitude is found to effect the post-detector processing scheme to a small extent. The distance measurement error has been evaluated over the sounding and reflected pulses front range. The distance measurement accuracy is compared for various post-detector processing schemes. The critical slope angle value of the underlying surface is found at which the input photodetector signal power equals the threshold one.