

Р- 6264/
154 996/39/3-4

ISSN 0021-3470

62

ИЗВЕСТИЯ
ВЫСШИХ УЧЕБНЫХ
ЗАВЕДЕНИЙ

РАДИОЭЛЕКТРОНИКА

ТОМ 39

3-4

ИЗДАНИЕ
КИЕВСКОГО
ПОЛИТЕХНИЧЕСКОГО
ИНСТИТУТА

1996

ОЦЕНКА ПЕРИОДА СЛЕДОВАНИЯ ОПТИЧЕСКИХ ИМПУЛЬСОВ С НЕИЗВЕСТНОЙ ИНТЕНСИВНОСТЬЮ

Методом локально-марковской аппроксимации получены характеристики оценок периода следования оптических импульсов с прямоугольной формой интенсивности. Определены потери в точности оценки из-за незнания величины интенсивности импульсов.

В системах оптической связи и локации широко применяются последовательности оптических импульсов [1, 2]. Необходимость в оценке их периода следования возникает при измерении скорости цели в оптической локации [1], при обеспечении синхронизации в подвижных системах связи [2] и т. д. Физические эффекты, сопровождающие рассеяние и распространение света в различных средах, приводят к тому, что интенсивность принимаемых оптических сигналов, как правило, неизвестна [1, 2]. В связи с чем рассмотрим оценку периода следования оптических импульсов с неизвестной интенсивностью.

Пусть на интервале времени $[0, T]$ наблюдается последовательность N оптических импульсов с интенсивностью

$$s(t, \theta, a_k) = \sum_{k=0}^{N-1} a_k I[(t - k\theta) / \tau]. \quad (1)$$

Здесь a_k — интенсивность k -го импульса, θ — период следования, τ — длительность одного импульса, а $I(x) = 1$ при $|x| < 1/2$ и $I(x) = 0$ при $|x| > 1/2$. Полагаем, что последовательность оптических импульсов с интенсивностью (1) наблюдается на фоне оптического шума с интенсивностью ν и интервал наблюдения больше длительности всей последовательности (1), т. е. $T > N\theta$. Тогда обработке доступна реализация $\pi(t)$ пуассоновского процесса с интенсивностью $\nu + s(t, \theta_0, a_{0k})$, где θ_0, a_{0k} — неизвестные истинные значения периода следования и интенсивности отдельных импульсов. Скважность последовательности (1) считаем не слишком малой ($\theta / \tau > 2 \dots 3$) так, что отдельные импульсы не перекрываются.

Рассмотрим вначале квазиправдоподобную оценку (КПО) $\hat{\theta}_q$ периода следования θ_0 . Эту оценку получаем, используя алгоритм максимального правдоподобия, синтезированный в предположении, что интенсивности всех импульсов последовательности (1) одинаковы. При одинаковых интенсивностях импульсов последовательности (1) член логарифма функционала отношения правдоподобия (ФОР), зависящий от неизвестного периода, запишется как [3]

$$L_q = \sum_{k=0}^{N-1} \int_{k\theta - \tau/2}^{k\theta + \tau/2} d\pi(t) = \sum_{k=0}^{N-1} \pi_k(\theta). \quad (2)$$

В результате КПО $\hat{\theta}_q$ периода следования импульсов θ_0 представляет собой положение абсолютного (наибольшего) максимума функции (2)

$$\hat{\theta}_q \arg \sup L_q(\theta). \quad (3)$$

Для определения характеристик КПО (3) представим слагаемые суммы (2) в виде

$$\pi_k(\theta) = \mu + \mu q_k S_k(\theta, \theta_0) + N_k(\theta) \sqrt{\mu}, \quad (4)$$

где $\mu = \nu \tau$, $q_k = a_{0k} / \nu$,

$$S_k(\theta, \theta_0) = \max [1 - |\theta - \theta_0| k / \tau, 0], \quad (5)$$

а $N_k(\theta) = [\pi_k(\theta) - M \{\pi_k(\theta)\}] / \sqrt{\mu}$ — нормированная шумовая функция для одного импульса, причем

$$\begin{aligned} M \{N_k(\theta)\} &= 0, B_k(\theta_1, \theta_2) = M \{N_k(\theta_1) N_k(\theta_2)\} = \\ &= S_k(\theta_1, \theta_2) + q_k I [k(\theta_1 - \theta_0) / \tau] I [k(\theta_2 - \theta_0) / \tau] \times \\ &\times I [k(\theta_1 - \theta_2) / \tau] \{1 - [\max(\theta_0, \theta_1, \theta_2) - \min(\theta_0, \theta_1, \theta_2)] k / \tau\}. \end{aligned} \quad (6)$$

Используя представление (4), перепишем (2) в виде суммы сигнальной и шумовой функций [4]

$$L_q(\theta) = S_q(\theta) + N_q(\theta) + N\mu, \quad (7)$$

$$S_q(\theta) = M \{L_q(\theta)\} - N\mu = \mu \sum_{k=0}^{N-1} q_k S_k(\theta, \theta_0), \quad (8)$$

$$N_q(\theta) = L_q(\theta) - M \{L_q(\theta)\} = \sum_{k=0}^{N-1} N_k(\theta) \sqrt{\mu}. \quad (9)$$

Шумовая функция (9) является реализацией случайного процесса, первые два момента которого определяются выражениями

$$\begin{aligned} M \{N_q(\theta)\} &= 0, B_q(\theta_1, \theta_2) = M \{N_q(\theta_1) N_q(\theta_2)\} = \\ &= \mu \sum_{k=0}^{N-1} B_k(\theta_1, \theta_2). \end{aligned} \quad (10)$$

Согласно (5), (8) сигнальная функция в (7) достигает максимума при $\theta = \theta_0$. Следовательно, выходное отношение сигнал—шум (ОСШ) для квазиправдоподобного приемника можем записать как [4]

$$z_q^2 = S_q^2(\theta_0) / B_q(\theta_0, \theta_0) = \mu \left(\sum_{k=0}^{N-1} q_k^2 \right)^2 / (N + \sum_{k=0}^{N-1} q_k). \quad (11)$$

В дальнейшем полагаем, что ОСШ (11) достаточно велико, так что КПО (3) обладает высокой апостериорной точностью [4]. Тогда для определения характеристик КПО достаточно исследовать центральные пики функций (8) и (10). Если

$$\Delta = \max \{ |\theta - \theta_0|, |\theta_1 - \theta_0|, |\theta_2 - \theta_0|, |\theta_1 - \theta_2| \} < \tau / (N - 1), \quad (12)$$

то выражение для сигнальной функции (8) и корреляционной функции (10) принимают вид

$$S_q(\theta) = A_S - B_S |\theta - \theta_0|, \quad (13)$$

$$B_q(\theta_1, \theta_2) = A_N - B_N |\theta_1 - \theta_2| - C_N [\max(\theta_0, \theta_1, \theta_2) - \min(\theta_0, \theta_1, \theta_2)]. \quad (14)$$

Здесь

$$\begin{aligned} A_S &= \mu \sum_{k=0}^{N-1} q_k, B_S = \nu \sum_{k=0}^{N-1} k q_k, A_N = \mu \sum_{k=0}^{N-1} (1 + q_k), \\ B_N &= \nu \sum_{k=0}^{N-1} k = \nu N(N-1)/2, C_N = \nu \sum_{k=0}^{N-1} k q_k. \end{aligned} \quad (15)$$

Согласно (13), (14) у сигнальной и корреляционной функций не существует второй производной по оцениваемому параметру при $\theta = \theta_0 = \theta_1 = \theta_2$. Следовательно, сигнал с интенсивностью (1) является разрывным по параметру θ . Найти дисперсию КПО (3) периода следования в этом случае можно с помощью метода локально-марковской аппроксимации [5]

$$D(\theta) = 13(2B_N + C_N)^2 / 8B_S^4. \quad (16)$$

Подставляя в (16) значения коэффициентов (15), получаем дисперсию КПО (3)

$$D_q(\theta) = M \{(\hat{\theta}_q - \theta_0)^2\} = 26 \left[\sum_{k=0}^{N-1} k(2 + q_k) \right]^2 \left[2 \sum_{k=0}^{N-1} k q_k \sqrt{\nu} \right]^{-4}. \quad (17)$$

Чтобы определить потери в точности КПО (3) периода следования оптических импульсов из-за незнания их интенсивности, найдем дисперсию оценки максимального правдоподобия (ОМП) периода следования при априори известных интенсивностях импульсов. С этой целью запишем логарифм ФОП для всех неизвестных параметров последовательности оптических импульсов с интенсивностью (1). Согласно [3] логарифм ФОП

$$L(\theta, a_k) = \sum_{k=0}^{N-1} \ln(1 + a_k / \nu) \pi_k(\theta) - \tau \sum_{k=0}^{N-1} a_k. \quad (18)$$

Полагая здесь $a_k = a_{0k}$, для ОМП периода следования импульсов с априори известными интенсивностями имеем

$$\hat{\theta} = \arg \sup L_0(\theta), \quad (19)$$

где

$$L_0(\theta) = L(\theta, a_{0k}). \quad (20)$$

Для определения характеристик ОМП (19) представим (20) в виде суммы сигнальной и шумовой функций [4]

$$L_0(\theta) = S_0(\theta) + N_0(\theta) + \mu \sum_{k=0}^{N-1} [\ln(1 + q_k) - q_k],$$

$$S_0(\theta) = \mu \sum_{k=0}^{N-1} q_k \ln(1 + q_k) S_k(\theta, \theta_0). \quad (21)$$

Шумовая функция

$$N_0(\theta) = L_0(\theta) - M\{L_0(\theta)\} = \sum_{k=0}^{N-1} \ln(1 + q_k) N_k(\theta) \sqrt{\mu}$$

является реализацией случайного процесса, причем

$$M\{N_0(\theta)\} = 0, B_0(\theta_1, \theta_2) = M\{N_0(\theta_1) N_0(\theta_2)\} =$$

$$= \mu \sum_{k=0}^{N-1} [\ln(1 + q_k)]^2 B_k(\theta_1, \theta_2), \quad (22)$$

где $B_k(\theta_1, \theta_2)$ определяется из (6).

Сигнальная функция (21) достигает максимума при $\theta = \theta_0$, так что выходное ОСШ для всей последовательности (1) будет равно [4]

$$z^2 = S_0^2(\theta_0) / B_0(\theta_0, \theta_0) = \mu \left[\sum_{k=0}^{N-1} q_k \ln(1 + q_k) \right]^2 \times \\ \times \left\{ \sum_{k=0}^{N-1} (1 + q_k) [\ln(1 + q_k)]^2 \right\}^{-1}. \quad (23)$$

Полагаем, что ОСШ (23) достаточно велико, так что ОМП (19) обладает высокой апостериорной точностью [4]. Тогда при выполнении (12), центральные пики функций (21), (22) можно описать соответственно формулами (13) и (14), где следует вместо (15) положить

$$A_S = \mu \sum_{k=0}^{N-1} q_k \ln(1 + q_k), \quad B_S = \nu \sum_{k=0}^{N-1} k q_k \ln(1 + q_k), \\ A_N = \mu \sum_{k=0}^{N-1} (1 + q_k) [\ln(1 + q_k)]^2, \\ B_N = \nu \sum_{k=0}^{N-1} k [\ln(1 + q_k)]^2, \\ C_N = \nu \sum_{k=0}^{N-1} k q_k [\ln(1 + q_k)]^2. \quad (24)$$

Подставляя (24) в (16), получаем дисперсию ОМП (19) периода следования оптических импульсов с априори известной интенсивностью

$$D_0(\theta) = M \{(\hat{\theta} - \theta_0)^2\} = 26 \left\{ \sum_{k=0}^{N-1} k (2 + q_k) [\ln(1 + q_k)]^2 \right\}^2 \times \\ \times \left[2 \sum_{k=0}^{N-1} k q_k \ln(1 + q_k) \sqrt{\nu} \right]^{-4}. \quad (25)$$

Сравнивая (17) и (25), находим проигрыш в точности КПО (3) периода следования оптических импульсов из-за незнания их интенсивности

$$\chi_q = \frac{D_q(\theta)}{D_0(\theta)} =$$

$$= \left\{ \frac{\sum_{k=0}^{N-1} k(2+q_k)}{\sum_{k=0}^{N-1} k(2+q_k) [\ln(1+q_k)]^2} \left[\frac{\sum_{k=0}^{N-1} k q_k \ln(1+q_k)}{\sum_{k=0}^{N-1} k q_k} \right]^2 \right\}^2. \quad (26)$$

Очевидно, когда интенсивности всех оптических импульсов одинаковы, КПО (3) совпадает с ОМП (19) и $\chi_q = 1$. Если, при достаточно больших ОСШ (11) и (23), интенсивность каждого импульса последовательности мала, т. е.

$$q_k \ll 1, \quad k = \overline{0, N-1}, \quad (27)$$

то (26) принимает вид: $\chi_q = \left[\frac{\left(\sum_{k=0}^{N-1} k \right) \left(\sum_{k=0}^{N-1} k q_k^2 \right) / \left(\sum_{k=0}^{N-1} k q_k \right)^2}{\left(\sum_{k=0}^{N-1} k \right) \left(\sum_{k=0}^{N-1} k q_k^2 \right) / \left(\sum_{k=0}^{N-1} k q_k \right)^2} \right]^2$. Воспользовавшись неравенством Буняковского—Коши, получаем, что $\chi_1 \geq 1$, т. е. в общем случае точность КПО (3) уступает точности ОМП (19) периода следования импульсов с известной интенсивностью.

Повысить точность измерения периода следования импульсов с неизвестной интенсивностью можно, реализуя совместную ОМП всех неизвестных параметров последовательности [4]. Заменяем с этой целью в (18) неизвестные интенсивности a_k отдельных импульсов последовательности на их ОМП. Решая систему уравнений максимального правдоподобия: $[\partial L(\theta, a_k) / \partial a_k] \hat{a}_k = 0, \quad k = \overline{0, N-1}$, находим ОМП неизвестных интенсивностей импульсов последовательности

$$\hat{a}_k = \pi_k(\theta) / \tau - \nu. \quad (28)$$

Подставляя (28) в (18), имеем

$$L_a(\theta) = \max_{a_k} L(\theta, a_k) = L(\theta, \hat{a}_k) = \sum_{k=0}^{N-1} \pi_k(\theta) \{ \ln [\pi_k(\theta) / \mu] - 1 \} + N\mu. \quad (29)$$

В результате ОМП $\hat{\theta}_a$ периода следования импульсов θ_0 с неизвестной интенсивностью представляет собой положение абсолютного максимума функции (29)

$$\hat{\theta}_a = \arg \sup L_a(\theta). \quad (30)$$

Подставляя в (29) значение $\pi_k(\theta)$ из (4) для нормированного логарифма ФОП, имеем

$$L_a(\theta) / \mu = \sum_{k=0}^{N-1} [1 + q_k S_k(\theta, \theta_0) + \varepsilon N_k(\theta)] \times \\ \times \{ \ln [1 + q_k S_k(\theta, \theta_0) + \varepsilon N_k(\theta)] - 1 \} + N, \quad (31)$$

где $\varepsilon = 1 / \sqrt{\mu}$. При достаточно больших значениях μ параметр $\varepsilon \ll 1$. Разложим (31) в ряд Маклорена по ε до первого члена, зависящего от реализации наблюдаемых данных. В результате получим

$$L_a \approx S_a(\theta) + N_a(\theta), \quad (32)$$

$$S_a(\theta) = \mu \sum_{k=0}^{N-1} \varphi_k(\theta, \theta_0) [\ln \varphi_k(\theta, \theta_0) - 1], \quad (33)$$

$$N_a(\theta) = \sum_{k=0}^{N-1} N_k(\theta) \ln \varphi_k(\theta, \theta_0) \sqrt{\mu},$$

$$\varphi_k(\theta, \theta_0) = 1 + q_k S_k(\theta, \theta_0).$$

Шумовая функция $N_a(\theta)$ в (32) является реализацией случайного процесса, для которого

$$M \{N_a(\theta)\} = 0, B_a(\theta_1, \theta_2) = M \{N_a(\theta_1) N_a(\theta_2)\} = \\ = \mu \sum_{k=0}^{N-1} B_k(\theta_1, \theta_2) \ln \varphi_k(\theta_1, \theta_0) \ln \varphi_k(\theta_2, \theta_0), \quad (34)$$

где $B_k(\theta_1, \theta_2)$ определяется из (6).

Сигнальная функция (33) в (32) достигает максимума при $\theta = \theta_0$, так что выходное ОСШ для всей последовательности (1) будет равно [4]

$$z_a^2 = S_a^2(\theta_0) / B_a(\theta_0, \theta_0) =$$

$$= \mu \left\{ \sum_{k=0}^{N-1} (1 + q_k) [\ln(1 + q_k) - 1] \right\}^2 / \sum_{k=0}^{N-1} (1 + q_k) [\ln(1 + q_k)]^2. \quad (35)$$

Считаем, что ОСШ (35) достаточно велико, так что ОМП (30) обладает высокой апостериорной точностью [4]. Тогда для расчета характеристик ОМП (30) достаточно исследовать поведение $L_a(\theta)$ (32) в малой окрестности θ_0 . Полагая, что в (12) $\Delta \rightarrow 0$, разложим (33) и (34) в ряд по степеням

Δ. Отбрасывая члены разложения порядка малости Δ^2 и менее, получаем для (33) и (34) асимптотические разложения в виде (13) и (14) соответственно. Эти формулы описывают (33) и (34) с точностью до членов порядка малости $o(\Delta)$, и в них следует вместо (15) положить

$$\begin{aligned} A_S &= \mu \sum_{k=0}^{N-1} (1 + q_k) [\ln(1 + q_k) - 1], \\ B_S &= \nu \sum_{k=0}^{N-1} k \ln(1 + q_k), \\ A_N &= \mu \sum_{k=0}^{N-1} (1 + q_k) [\ln(1 + q_k)]^2, \\ B_N &= \nu \sum_{k=0}^{N-1} k \ln(1 + q_k) [\ln(1 + q_k) - 1], \\ C_N &= \nu \sum_{k=0}^{N-1} k \ln(1 + q_k) [2 + q_k \ln(1 + q_k)]. \end{aligned} \quad (36)$$

Подставляя (36) в (16), получаем дисперсию ОМП (30) периода следования оптических импульсов с априори неизвестной интенсивностью

$$D_a(\theta) = M \{(\hat{\theta}_a - \theta_0)^2\} = D_0(\theta), \quad (37)$$

где $D_0(\theta)$ определяется из (25). Согласно (37) при $\mu \gg 1$ дисперсия ОМП периода следования оптических импульсов с априори известной интенсивностью (19) совпадает с дисперсией ОМП периода следования импульсов с априори неизвестной интенсивностью (30). Следовательно, незнание интенсивности импульсов не влияет на дисперсию ОМП периода следования в условиях высокой апостериорной точности. Незнание интенсивности приводит лишь к необходимости использовать более сложный с точки зрения аппаратной реализации, алгоритм оценки (29), (30) вместо более простого (18), (19).

Структура ОМП периода следования оптических импульсов с неизвестной интенсивностью (29), (30) можно несколько упростить в практически важном случае слабых оптических импульсов, когда выполняется (27). При $a_k \ll \nu$ приближенно представим (18) как

$$L(\theta, a_k) \simeq L_S(\theta, a_k) = \sum_{k=0}^{N-1} a_k [\pi_k(\theta) - \mu] / \nu. \quad (38)$$

Заменив в (38) неизвестные интенсивности импульсов a_k на их ОМП (28), получаем функцию

$$L_S(\theta) = L_S(\theta, \hat{a}_k) = \sum_{k=0}^{N-1} [\pi_k(\theta) - \mu]^2 / \mu. \quad (39)$$

Оценку $\hat{\theta}_S$ периода следования θ_0 слабых оптических сигналов определим как положение абсолютного максимума функции (39)

$$\hat{\theta}_S = \arg \sup L_S(\theta). \quad (40)$$

В отличие от ОМП (30) для реализации оценки (40) достаточно использовать в (39) более простой квадратичный преобразователь вместо логарифмического в (29).

Чтобы определить дисперсию оценки (40), представим (39) в виде суммы сигнальной и шумовой функций [4]

$$L_S(\theta) = S_S(\theta) + N_S(\theta) + \sum_{k=0}^{N-1} (1 + q_k), \quad (41)$$

$$S_S(\theta) = \mu \sum_{k=0}^{N-1} q_k^2 S_k^2(\theta, \theta_0), \quad (42)$$

$$N_S(\theta) = L_S(\theta) - M\{L_S(\theta)\} = \sum_{k=0}^{N-1} [2 q_k S_k(\theta, \theta_0) N_k(\theta) \sqrt{\mu} + N_k^2(\theta) - (1 + q_k)]. \quad (43)$$

Шумовая функция (43) является реализацией случайного процесса, причём $M\{N_S(\theta)\} = 0$,

$$B_S(\theta_1, \theta_2) = M\{N_S(\theta_1) N_S(\theta_2)\} = 2 \sum_{k=0}^{N-1} B_k(\theta_1, \theta_2) \times \\ \times [2 q_k^2 S_k(\theta_1, \theta_0) S_k(\theta_2, \theta_0) + B_k(\theta_1, \theta_2)], \quad (44)$$

где $S_k(\theta_1, \theta_2)$ определяется из (5), а $B_k(\theta_1, \theta_2)$ — из (6).

Сигнальная функция (42) в (41) достигает максимума при $\theta = \theta_0$, так что выходное ОСШ будет равно [4]

$$z_S^2 = S_S^2(\theta_0) / B_S(\theta_0, \theta_0) = \mu^2 \left(\sum_{k=0}^{N-1} q_k^2 \right)^2 \times$$

$$\times \left[2 \sum_{k=0}^{N-1} (1 + q_k)^2 (1 + 4\mu q_k^2) \right]^{-1}. \quad (45)$$

Считаем, что ОСШ (45) достаточно велико, так что оценка (40) обладает высокой апостериорной точностью. Тогда для определения дисперсии оценки (40) достаточно исследовать поведение $L_S(\theta)$ (39) в малой окрестности θ_0 . Полагая, что в (12) $\Delta \rightarrow 0$ разложим (42), (44) в ряд по степеням Δ . Отбрасывая члены разложения, порядка малости Δ^2 и менее, получаем для (42) и (44) асимптотические разложения в виде (13) и (14) соответственно. Эти формулы описывают (42) и (44) с точностью до членов порядка малости $o(\Delta)$ и в них вместо (15) следует положить

$$\begin{aligned} A_S &= \mu \sum_{k=0}^{N-1} q_k^2, \quad B_S = 2\nu \sum_{k=0}^{N-1} k q_k^2, \\ A_N &= 2 \sum_{k=0}^{N-1} (1 + q_k)^2 (1 + 4\mu q_k^2), \\ B_N &= 4 \sum_{k=0}^{N-1} k (1 + q_k - \mu q_k^3) / \tau, \\ C_N &= 4 \sum_{k=0}^{N-1} k q_k [1 + q_k + \mu q_k (2 + 3 q_k)] / \tau. \end{aligned} \quad (46)$$

Подставляя (46) в (16), получаем дисперсию оценки (40) периода следования слабых оптических импульсов с неизвестной интенсивностью

$$\begin{aligned} D_S(\theta) &= M \{ (\hat{\theta}_S - \theta_0)^2 \} = \\ &= 26 \left\{ \sum_{k=0}^{N-1} k [2 + 3 q_k + q_k^2 + \mu q_k^2 (2 + q_k)] \right\}^2 \times \\ &\quad \times \left\{ 2 \sum_{k=0}^{N-1} k q_k^2 \sqrt{\mu \nu} \right\}^{-4}. \end{aligned} \quad (47)$$

Сравнивая (25) и (47), находим проигрыш в точности оценки (40) периода следования по сравнению с ОМП (19)

$$\chi_S = \frac{D_S(\theta)}{D_0(\theta)} = \left[\frac{\sum_{k=0}^{N-1} k [2 + 3 q_k + q_k^2 + \mu q_k^2 (2 + q_k)]}{\mu \sum_{k=0}^{N-1} k (2 + q_k) [\ln(1 + q_k)]^2} \cdot \left[\frac{\sum_{k=0}^{N-1} k q_k \ln(1 + q_k)}{\sum_{k=0}^{N-1} k q_k^2} \right]^2 \right]^2 \quad (48)$$

Если выполняется (27) и одновременно $\mu q_k^2 \gg 1$, то из (48) имеем $\chi_S \approx 1$. Следовательно, в этом случае проигрыш в точности оценки (40) по сравнению с ОМП (19), (30) отсутствует.

Таким образом, полученные результаты позволяют сделать обоснованный выбор между алгоритмами (3), (30), (40) оценки периода следования оптических импульсов с неизвестной интенсивностью в зависимости от требований, предъявляемых к точности оценки и степени простоты технической реализации алгоритма. Приведенные результаты получены при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Воробьев В. И. Оптическая локация для радионинженеров. — М. : Радио и связь, 1983. — 176 с.
2. Гольярди Р. М., Карп Ш. Оптическая связь. — М. : Связь, 1978. — 424 с.
3. Большаков И. А., Ракошиц В. С. Прикладная теория случайных потоков. — М. : Сов. радио, 1978. — 248 с.
4. Куликов Е. И., Трифонов А. П. Оценка параметров сигналов на фоне помех. — М. : Сов. радио, 1978. — 296 с.
5. Трифонов А. П., Шинаков Ю. С. Совместное различение сигналов и оценка их параметров на фоне помех. — М. : Радио и связь, 1986. — 264 с.

Воронежский госуниверситет.

Поступила в редакцию 26.04.95.