Том 54, № 7
июль 2011

ISSN 0021-3470

РАДИОЭЛЕКТРОНИКА

ИЗВЕСТИЯ ВЫСШИХ УЧЕБНЫХ ЗАВЕДЕНИЙ

ИЗДАНИЕ
НАЦИОНАЛЬНОГО
ТЕХНИЧЕСКОГО
УНИВЕРСИТЕТА
УКРАИНЫ
«КИЕВСКИЙ
ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ
ИНСТИТУТ»

УДК 621.391.16

ТРИФОНОВ А.П., БЕСПАЛОВА М.Б., ТРИФОНОВ П.А.

ЭФФЕКТИВНОСТЬ СВЕРХШИРОКОПОЛОСНОЙ ОЦЕНКИ ДАЛЬНОСТИ И СКОРОСТИ ЦЕЛИ ПРИ НАЛИЧИИ УЗКОПОЛОСНОЙ ПОМЕХИ

Воронежский государственный университет,
Россия, Воронеж, 394006, Университетская пл., 1

Аннотация. Найдены характеристики двух алгоритмов оценки дальности и скорости. Исследовано влияние узкополосной гауссовской помехи на точность оценок

Abstract. Characteristics of two estimate algorithms are found. Influence of narrow–band Gaussian interference on accuracy of estimates are investigated

Ключевые слова: сверхширокополосная оценка дальности и скорости, узкополосная помеха, характеристики оценок, ultra-wideband range estimate, velocity estimate, narrowband interference, estimate characteristics

В [1–4] и др. рассмотрены возможности применения сверхкоротких (субнаносекундных) импульсов и их последовательностей в радиолокации. Короткоимпульсные сигналы и их последовательности представляют собой частный случай сверхширокополосных сигналов (СШПС), использование которых имеет свою специфику и позволяет расширить возможности радиолокации. В [4] найдены характеристики сверхширокополосных оценок дальности и скорости цели при воздействии помех в виде гауссовского белого шума (ГБШ). Однако, в реальных условиях, кроме ГБШ, часто действуют преднамеренные помехи, которые можно интерпретировать как гауссовский узкополосный случайный процесс [5]. В связи с этим рассмотрим сверхширокополосную оценку дальности и скорости при воздействии как ГБШ так и гауссовской узкополосной помехи (ГУП).

Аналогично [4] зондирующую последовательность СШПС запишем в виде

$$\widetilde{s}_N(t)=\sum_{k=0}^{N-1} s_0[t-(k-\mu)\theta-\lambda], \qquad (1)$$

где функция $s_0(\cdot)$ описывает форму одного импульса, θ — период следования, λ — временное положение последовательности. Параметр μ определяет точку последовательности (1), с которой связано ее временное положение. Так, при $\mu=0$ величина λ представляет собой временное положение первого импульса последовательности, при $\mu=(N-1)/2$ — временное положение середины последовательности, а при $\mu=N-1$ — временное положение последнего импульса последовательности (1).

Полагаем, что зондирующая последовательность (1) рассеивается целью с дальностью R_0 и радиальной скоростью V_0, причем

$$|V_0| \ll c, \qquad (2)$$

где c — скорость света. Тогда принимаемый сигнал можно записать как [4]

$$s(t,R_0,V_0)=$$
$$=\sum_{k=0}^{N-1} s\,[t-2R_0/c-(k-\mu)\theta(1+2V_0/c)]. \qquad (3)$$

Функция $s(\cdot)$ описывает форму одного принимаемого СШПС и в общем случае отличается от $s_0(\cdot)$ в (1) [4].

При воздействии ГБШ и ГУП на интервале времени $[0, T]$ наблюдается реализация

$$x(t) = s(t, R_0, V_0) + n(t) + y(t). \qquad (4)$$

Здесь $n(t)$ — центрированный ГБШ с односторонней спектральной плотностью N_0, $y(t)$ — центрированная ГУП, которая обладает корреляционной функцией $K_y(\tau) = \langle y(t) y(t+\tau) \rangle$ и спектральной плотностью

$$G_y(\omega) = \int_{-\infty}^{\infty} K_y(\tau) \exp(-j\omega\tau) d\tau. \qquad (5)$$

Процессы $n(t)$ и $y(t)$ предполагаются статистически независимыми.

Положим вначале, что корреляционная функция и спектральная плотность ГУП априори неизвестны. В этом случае для оценки дальности и скорости предлагается использовать алгоритм максимального правдоподобия, синтезированный при условии, что ГУП отсутствует. Пусть скважность последовательности (3) достаточно велика, так что отдельные импульсы не перекрываются и интервал наблюдения $[0, T]$ больше длительности всей последовательности, т.е. $T > N\theta$. Тогда, при воздействии только ГБШ, логарифм функционала отношения правдоподобия, опуская несущественное слагаемое, можно записать в виде [4, 6]

$$L_1(R,V) = \frac{2}{N_0} \times$$

$$\times \sum_{k=0}^{N-1} \int_0^T x(t) s[t - 2R/c - (k-\mu)\theta(1 + 2V/c)] dt. (6)$$

Реализация наблюдаемых данных $x(t)$ (4) кроме ГБШ $n(t)$ содержит ГУП $y(t)$. Поэтому оценки

$$(\hat{R}_1, \hat{V}_1) = \operatorname{argsup} L_1(R,V) \qquad (7)$$

не являются оценками максимального правдоподобия (ОМП). Эти оценки можно назвать квазиправдоподобными (КПО) [7], поскольку они совпадают с ОМП при $y(t) \equiv 0$, т.е. в отсутствии ГУП.

Для определения характеристик КПО представим (6) в виде суммы сигнальной и шумовой функции [6]

$$L_1(R,V) = S_1(R, R_0, V, V_0) + N_1(R,V). \qquad (8)$$

Здесь сигнальная функция

$$S_1(R, R_0, V, V_0) = \frac{2}{N_0} \sum_{k=0}^{N-1} \sum_{n=0}^{N-1} \int_0^T s[t -$$

$$-2R_0/c - (k-\mu)\theta(1 + 2V_0/8c)] \times$$

$$\times s[t - 2R/c - (n-\mu)\theta(1 + 2V/c)] dt, \qquad (9)$$

а шумовая функция $N_1(R,V) = L_1(R,V) - \langle L_1(R,V) \rangle$ является реализацией гауссовского случайного поля. Первые два момента шумовой функции имеют вид

$$\langle N_1(R,V) \rangle = 0, \; K_1(R_1, R_2, V_1, V_2) =$$

$$= \langle N_1(R_1, V_1) N_1(R_2, V_2) \rangle =$$

$$= \sum_{k=0}^{N-1} \sum_{n=0}^{N-1} \left\{ \frac{2}{N_0} \int_0^T s[t - 2R_1/c - (k-\mu)\theta(1 + \right.$$

$$+2V_1/c)] s[t - 2R_2/c - (n-\mu)\theta(1 + 2V_2/c)] dt +$$

$$+ \frac{4}{N_0^2} \int_0^T \int_0^T K_y(t_2 - t_1) s[t_1 - 2R_1/c - (k-\mu)\theta(1 +$$

$$+2V_1/c)] s[t_2 - 2R_2/c -$$

$$\left. -(n-\mu)\theta(1 + 2V_2/c)] dt_1 dt_2 \right\}. \qquad (10)$$

Поскольку предполагается $T > N\theta$, так что вся принимаемая последовательность (3) размещается внутри интервала наблюдения, пределы интегрирования в (9), (10) можно заменить на бесконечные. В результате получаем

$$S_1(R,R_0,V,V_0)=\sum_{k=0}^{N-1}\sum_{n=0}^{N-1}S_f\{2(R-R_0)/c+$$

$$+(n-k)\theta+2\theta[nV-kV_0-\mu(V-V_0)]/c\},\qquad(11)$$

$$K_1(R_1,R_2,V_1,V_2)=\sum_{k=0}^{N-1}\sum_{n=0}^{N-2}K_H\{2(R_2-R_1)/c+$$

$$+(n-k)\theta+2\theta[nV_2-kV_1-\mu(V_2-V_1)]/c\}.\qquad(12)$$

В (11), (12) обозначено

$$S_f(\tau)=\frac{2}{N_0}\int_{-\infty}^{\infty}s(t)s(t-\tau)\mathrm{d}t$$

— сигнальная функция (функция неопределенности) [6] для одиночного СШПС последовательности (3), а

$$K_H(\eta)=S_f(\eta)+\frac{4}{N_0^2}\times$$

$$\times\int_{-\infty}^{\infty}\int_{-\infty}^{\infty}K_y(t_2-t_1+\eta)s(t_1)s(t_2)\mathrm{d}t_1\mathrm{d}t_2.$$

Обозначим τ_s — длительность одного импульса последовательности (3), а τ_y — время корреляции ГУП, так, что $S_f(\pm\tau_s)\approx 0$ и $K_y(\pm\tau_y)\approx 0$. Ограничимся рассмотрением центральных пиков сигнальной (11) и корреляционной (12) функций, положив, что кроме (2) выполняется условие

$$\max\{|R-R_0|,|R_1-R_2|\}\le c\theta/2.\qquad(13)$$

Пусть скважность принимаемой последовательности СШПС (3) достаточно велика, так что

$$\tau_s<<\theta,\quad \tau_y<<\theta.\qquad(14)$$

Тогда для слагаемых в (11) имеем:

$$S_f\{2(R-R_0)/c+(n-k)\theta+$$

$$+2\theta[nV-kV_0-\mu(V-V_0)]/c\}\approx 0$$

при $n\ne k$ и

$$S_f\{(R-R_0)/c+(n-k)\theta+2\theta[nV-kV_0-$$

$$-\mu(V-V_0)]/c\}=S_f[2(R-R_0)/c+2\theta(k-\mu)\times$$

$$\times(V-V_0)/c]$$

при $n=k$. Соответственно, для слагаемых в (12) можем записать:

$$K_H\{2(R_2-R_1)/c+(n-k)\theta+$$

$$+2\theta[nV_2-kV_1-\mu(V_2-V_1)]/c\}\approx 0$$

при $n\ne k$ и

$$K_H\{2(R_2-R_1)/c+(n-k)\theta+2\theta[nV_2-kV_1-$$

$$-\mu(V_2-V_1)]/c\}=K_H[2(R_2-R_1)/c+$$

$$+2\theta(k-\mu)(V_2-V_1)/c]$$

при $n=k$. В результате, при выполнении (2), (13), (14) функции (11), (12) принимают вид

$$S_1(R,R_0,V,V_0)=\sum_{k=0}^{N-1}S_f[2(R-R_0)/c+$$

$$+2\theta(k-\mu)(V-V_0)/c],\qquad(15)$$

$$K_1(R_1,R_2,V_1,V_2)=\sum_{k=0}^{N-1}K_H[2(R_2-R_1)/c+$$

$$+2\theta(k-\mu)(V_2-V_1)/c].\qquad(16)$$

Очевидно [6], сигнальная функция (15) достигает максимума при $R=R_0, V=V_0$. Поэтому отношение сигнал–шум (ОСШ) [6] можно записать как

$$z_1^2=S_1^2(R_0,R_0,V_0,V_0)/K_1(R_0,R_0,V_0,V_0).\qquad(17)$$

Подставляя в (17) значения функций (15), (16) получаем для ОСШ

$$z_1^2 = z^2 / \chi_1 = N z_0^2 / \chi_1. \qquad (18)$$

Здесь $z^2 = N z_0^2$ — ОСШ на выходе приемника максимального правдоподобия при отсутствии ГУП, $z_0^2 = 2E / N_0$ — ОСШ для одного СШПС при отсутствии ГУП, а $E = \int_{-\infty}^{\infty} s^2(t) \mathrm{d}t$ — энергия одного СШПС последовательности (3). Величина χ_1 в (18) показывает, во сколько раз уменьшается ОСШ вследствие воздействия ГУП и определяется выражением

$$\chi_1 = 1 + \frac{2}{N_0} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} K_y(t_2 - t_1) \times$$

$$\times s(t_1) s(t_2) \mathrm{d}t_1 \mathrm{d}t_2 \Big/ \int_{-\infty}^{\infty} s^2(t) \mathrm{d}t. \qquad (19)$$

Согласно (7), КПО $\hat{R}_1$ и $\hat{V}_1$ являются решениями системы уравнений

$$\frac{\partial}{\partial R} \left[S_1(R, R_0, V, V_0) + N_1(R, V) \right]_{\hat{R}_1, \hat{V}_1} = 0,$$

$$\frac{\partial}{\partial V} \left[S_1(R, R_0, V, V_0) + N_1(R, V) \right]_{\hat{R}_1, \hat{V}_1} = 0. \qquad (20)$$

При этом, если шумовая функция в (8) отсутствует, т. е. $N_1(R, V) \equiv 0$, то функция (6) достигает максимума в точке (R_0, V_0). Следовательно КПО (7) будут асимптотически (с ростом ОСШ) несмещенными [6].

Положим ОСШ (18) достаточно большим, так что КПО (7) обладают высокой апостериорной точностью. Тогда решения системы уравнений (20) можно найти методом малого параметра [6], в качестве которого используем величину $1/z_1$. Ограничиваясь рассмотрением первого приближения, находим дисперсии КПО (7)

$$D_1(R) = \left\langle (\hat{R}_1 - R_0)^2 \right\rangle = (S_{RV}^2 K_V -$$

$$-2 S_{RV} S_V K_{RV} + S_V^2 K_R)(S_R S_V - S_{RV}^2)^{-1}, \quad (21)$$

$$D_1(V) = \left\langle (\hat{V}_1 - V_0)^2 \right\rangle = (S_R^2 K_V -$$

$$-2 S_R S_{RV} K_{RV} + S_{RV}^2 K_R)(S_R S_V - S_{RV}^2)^{-1}. \quad (22)$$

Здесь обозначено

$$S_R = \left[\frac{\partial^2 S_1(R, R_0, V, V_0)}{\partial R^2} \right],$$

$$S_V = \left[\frac{\partial^2 S_1(R, R_0, V, V_0)}{\partial V^2} \right],$$

$$S_{RV} = \left[\frac{\partial^2 S_1(R, R_0, V, V_0)}{\partial R \partial V} \right],$$

$$K_R = \left[\frac{\partial^2 K_1(R_1, R_2, V_1, V_2)}{\partial R_1 \partial R_2} \right],$$

$$K_V = \left[\frac{\partial^2 K_1(R_1, R_2, V_1, V_2)}{\partial V_1 \partial V_2} \right],$$

$$K_{RV} = \left[\frac{\partial^2 K_1(R_1, R_2, V, V_2)}{\partial R_1 \partial V_2} \right]. \qquad (23)$$

Все производные (23) вычисляются в точке (R_0, V_0). Подставляя (15), (16) в (23), а результат дифференцирования в (21), (22) для дисперсий КПО (7) дальности и скорости получаем выражения

$$D_1(R) = \left\langle (\hat{R}_1 - R_0)^2 \right\rangle = D_0(R) \kappa_1,$$

$$D_1(V) = \left\langle (\hat{V}_1 - V_0)^2 \right\rangle = D_0(V) \kappa_1.$$

Здесь

$$D_0(R) = \frac{c^2 N_0}{8 F_0} \frac{N^2 - 1 + 12\left[(N-1)/2 - \mu\right]^2}{N(N^2 - 1)},$$

(24)

$$D_0(V)=\frac{3c^2N_0}{2\theta^2F_0N(N^2-1)} \qquad (25)$$

— дисперсии ОМП дальности и скорости при отсутствии ГУП [4], $F_0=\int_{-\infty}^{\infty}[\mathrm{d}s(t)/\mathrm{d}t]^2\mathrm{d}t$.

Величина

$$\kappa_1=1+\frac{2}{N_0}\int_{-\infty}^{\infty}\int_{-\infty}^{\infty}K_y(t_2-t_1)\times$$

$$\times\frac{\mathrm{d}s(t_1)}{\mathrm{d}t_1}\frac{\mathrm{d}s(t_2)}{\mathrm{d}t_2}\mathrm{d}t_1\mathrm{d}t_2\,/\,F_0 \qquad (26)$$

показывает проигрыш в точности КПО (7) вследствие воздействия ГУП.

Наибольшую точность оценок дальности и скорости можно обеспечить, если априори известна корреляционная функция $K_y(\tau)$ ГУП. В этом случае, логарифм функционала отношения правдоподобия, опуская несущественное слагаемое, можно записать как [6]

$$L_2(R,V)=\sum_{k=0}^{N-1}\int_0^T x(t)v[t-2R/c-$$

$$-(k-\mu)\theta(1+2V/c)]\mathrm{d}t, \qquad (27)$$

где функция $v(t)$ определяется из решения интегрального уравнения

$$N_0v(t)/2+\int_0^T K_y(t-\tau)v(\tau)\mathrm{d}\tau=s(t).$$

Соответственно, ОМП ($\hat{R}_2,\hat{V}_2$) дальности R_0 и скорости V_0 имеет вид

$$(\hat{R}_2,\hat{V}_2)=\mathrm{argsup}L_2(R,V). \qquad (28)$$

Для определения характеристик ОМП представим (27) в виде суммы сигнальной и шумовой функций [6]

$$L_2(R,V)=S_2(R,R_0,V,V_0)+N_2(R,V).$$

Здесь при выполнении (2), (13), (14) сигнальная функция

$$S_2(R,R_0,V,V_0)=\sum_{k=0}^{N-1}\int_0^T s[t-2R_0/c-(k-\mu)\times$$

$$\times\theta(1+2V_0/c)]v\big[t-2R/c-(k-\mu)\theta(1+2V/c)\big]\mathrm{d}t, \qquad (29)$$

а корреляционная функция центрированной шумовой функции

$$K_2(R_1,R_2,V_1,V_2)=\langle N_2(R_1,V_1)N_2(R_2,V_2)\rangle=$$

$$=S_2(R_1,R_2,V_1,V_2). \qquad (30)$$

Для алгоритма (27), (28) ОСШ можно записать как [6]

$$z_2^2=S_2^2(R_0,R_0,V_0,V_0)=z^2/\chi_2. \qquad (31)$$

Здесь z^2 — ОСШ на выходе приемника максимального правдоподобия (6) при наличии только ГБШ. Величина χ_2 в (31) показывает, во сколько раз уменьшается ОСШ вследствие воздействия ГУП с априори известными характеристиками и определяется выражением

$$\chi_2=\frac{2}{N_0}\int_{-\infty}^{\infty}s^2(t)\mathrm{d}t\,/\int_{-\infty}^{\infty}s(t)v(t)\mathrm{d}t. \qquad (32)$$

Положим ОСШ (31) достаточно большим, так что ОМП (28) обладают высокой апостериорной точностью. Подставляя (29), (30) в (23), а результат дифференцирования — в (21), (22) для дисперсий ОМП (28) дальности и скорости находим

$$D_2(R)=\left\langle(\hat{R}_2-R_0)^2\right\rangle=D_0(R)\kappa_2,$$

$$D_2(V)=\left\langle(\hat{V}_2-V_0)^2\right\rangle=D_0(V)\kappa_2.$$

Здесь $D_0(R)$ (27) и $D_0(V)$ (28) — дисперсии ОМП дальности и скорости при наличии только ГБШ. Величина

$$\kappa_2 = \frac{2}{N_0}\int_{-\infty}^{\infty}\left[\frac{ds(t)}{dt}\right]^2 dt \Big/ \int_{-\infty}^{\infty}\frac{ds(t)}{dt}\frac{dv(t)}{dt}dt \quad (33)$$

показывает, во сколько раз увеличиваются дисперсии ОМП (28) вследствие воздействия ГУП.

Для расчета параметров (19), (26), (32), (33) определяющих результаты воздействия ГУП, часто удобно использовать частотное представление. Спектр одного СШПС последовательности (3) обозначим

$$S(j\omega) = \int_{-\infty}^{\infty} s(t)e^{-j\omega t}dt.$$

Тогда выражения для параметров (19), (26), (32), (33) перепишутся в виде

$$\chi_1 = 1 + \int_{-\infty}^{\infty}\rho(\omega)|S(j\omega)|^2 d\omega \Big/ \int_{-\infty}^{\infty}|S(j\omega)|^2 d\omega, \quad (34)$$

$$\chi_2 = \left[1 - \int_{-\infty}^{\infty}\frac{\rho(\omega)|S(j\omega)|^2}{1+\rho(\omega)}d\omega \Big/ \int_{-\infty}^{\infty}|S(j\omega)|^2 d\omega\right]^{-1}, \quad (35)$$

$$\kappa_1 = 1 + \int_{-\infty}^{\infty}\omega^2\rho(\omega)|S(j\omega)|^2 d\omega \Big/ \int_{-\infty}^{\infty}\omega^2|S(j\omega)|^2 d\omega, \quad (36)$$

$$\kappa_2 = \left[1 - \int_{-\infty}^{\infty}\frac{\omega^2\rho(\omega)|S(j\omega)|^2}{1+\rho(\omega)}d\omega \Big/ \int_{-\infty}^{\infty}\omega^2|S(j\omega)|^2 d\omega\right]^{-1}, \quad (37)$$

где $\rho(\omega) = 2G_y(\omega)/N_0$.

Очевидно, всегда $\chi_i \ge 1$ и $\kappa_i \ge 1$, $i = 1,2$, так что наличие ГУП снижает эффективность оценок, даже когда статистические характеристики ГУП априори известны.

Найдем параметры (34)–(37) для частного случая ГУП с прямоугольной формой спектральной плотности (5)

$$G_y(\omega) = \frac{\gamma}{2}\left[I\left(\frac{\omega_0-\omega}{\Omega}\right) + I\left(\frac{\omega_0+\omega}{\Omega}\right)\right]. \quad (38)$$

Здесь γ — величина спектральной плотности ГУП, ω_0 — центральная частота ГУП, Ω — ширина полосы частот ГУП, $I(x)=1$ при $|x| \le 1/2$ и $I(x)=0$ при $|x|>1/2$. Подставляя (38) в (34)–(37) получаем

$$\chi_1 = 1 + q\varepsilon, \quad \chi_2 = (1+q)/[1+q(1-\varepsilon)], \quad (39)$$

$$\kappa_1 = 1 + q\delta, \quad \kappa_2 = (1+q)/[1+q(1-\delta)]. \quad (40)$$

В (39), (40) обозначено: $q = \gamma/N_0$ — отношение спектральных плотностей ГУП и ГБШ,

$$\varepsilon = \int_{\omega_0-\Omega/2}^{\omega_0+\Omega/2}|S(j\omega)|^2 d\omega \Big/ \int_0^{\infty}|S(j\omega)|^2 d\omega$$

ε — относительная доля энергии одного СШПС в полосе частот, пораженной ГУП, а

$$\delta = \int_{\omega_0-\Omega/2}^{\omega_0+\Omega/2}\omega^2|S(j\omega)|^2 d\omega \Big/ \int_0^{\infty}\omega^2|S(j\omega)|^2 d\omega$$

δ — относительная доля энергии первой производной СШПС в полосе частот, пораженной ГУП. Сопоставляя параметры (39), (40) находим отношения

$$\chi_1/\chi_2 = 1 + q^2\varepsilon(1-\varepsilon)/(1+q) \ge 1, \quad (41)$$

$$\kappa_1/\kappa_2 = 1 + q^2\delta(1-\delta)/(1+q) \ge 1. \quad (42)$$

Отношение (41) показывает, во сколько раз увеличивается ОСШ, а отношение (42) — во сколько раз уменьшаются дисперсии оценок дальности и скорости вследствие наличия априорной информации о параметрах ГУП и использовании алгоритма (28) вместо алгоритма (7).

Таким образом, полученные результаты позволяют сделать обоснованный выбор между алгоритмами оценки дальности и скорости в зависимости от имеющийся априорной информации о параметрах ГУП и в зависимости от требований, предъявляемых к точности оценки.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Астанин Л.Ю.* Основы сверхширокополосных радиолокационных измерений / Л.Ю.Астанин, А.А.Костылев. — М. : Радио и связь, 1989. — 192 с.

2. *Хармут Х.Ф.* Несинусоидальные волны в радиолокации и радиосвязи / Х.Ф.Хармут. — М. : Радио и связь, 1985. — 376 с.

3. *Радзиевский В.Г.* Обработка сверхширокополосных сигналов и помех / В.Г.Радзиевский, П.А.Трифонов. — М. : Радиотехника, 2009. — 288 с.

4. *Трифонов А.П.* Эффективность сверхширокополосного обнаружения и измерения дальности и скорости цели / А.П.Трифонов, М.Б.Беспалова // Радиотехника и электроника. — 1997. — Т. 42, № 4 — С. 451–456.

5. *Радзиевский В.Г.* Теоретические основы радиоэлектронной разведки / В.Г.Радзиевский, А.А.Сирота. — М. : Радиотехника, 2004. — 384 с.

6. *Куликов Е.И.* Оценка параметров сигналов на фоне помех / Е.И.Куликов, А.П.Трифонов. — М. : Сов. радио, 1978. — 296 с.

7. *Мудров В.И.* Методы обработки измерений / В.И.Мудров, В.Л.Кушко. — М. : Радио и связь, 1983. — 304 с.

Поступила в редакцию 04.04.2011