ISSN 0021-3470

НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ
"КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ"

ИЗВЕСТИЯ
ВЫСШИХ УЧЕБНЫХ
ЗАВЕДЕНИЙ

РАДИОЭЛЕКТРОНИКА

ВОЕННЫЕ РАДИОЭЛЕКТРОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ

ТОМ 48

9-10
сентябрь-октябрь

ИЗДАНИЕ
НАЦИОНАЛЬНОГО
ТЕХНИЧЕСКОГО
УНИВЕРСИТЕТА
УКРАИНЫ
«КИЕВСКИЙ
ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ
ИНСТИТУТ»

2005

5. Патент 70868 А Україна, МПК G01J11/00, G01S13/00. Спосіб дистанційного моніторингу земної поверхні та інтегрована система для його реалізації/ *Зубков А. М., Прудіус І.Н., Смеркло Л. М.* (Україна). – №20031213144. — Заявлено 30.12.2003. — Опубл. 15.10.2004. — Бюл. №10. – 4 с.

6. *Корнблит С.* СВЧ оптика. Оптические принципы в приложении к конструированию СВЧ антенн: Пер. с англ. под ред. Фролова О.П. — М.: Связь, 1980.—360 с.

7. *Зубков А. Н., Коба С. И., Добрянский Н. С. и др.* Экспериментальная РЛС диапазона 94 ГГц для отработки бортовых систем самонаведения // Материалы 14-й Крымской международной конференции «СВЧ техника и телекоммуникационные технологии». — Севастополь. — 2004. — С. 764 — 766.

Львовский научно-исслед. радиотехн. ин-т

Поступила в редакцию 29.04.05

УДК 621.396

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

СВЕРХШИРОКОПОЛОСНАЯ СОВМЕСТНАЯ ОЦЕНКА ДАЛЬНОСТИ И СКОРОСТИ ФЛУКТУИРУЮЩЕЙ ЦЕЛИ

Найдены характеристики оценок максимального правдоподобия дальности и скорости медленно или быстро флуктуирующих целей. Определены потери в точности оценок вследствие флуктуаций цели.

В [1—5] 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), использованис которых имеет свою специфику и позволяет расширить возможности радиолокации. В [4] найдены характеристики совместной сверхширокополосной оценки дальности и скорости стабильной цели, но многие реальные цели являются флуктуирующими [6]. В [5] найдены характеристики сверхширокополосной оценки дальности флуктуирующей цели. Рассмотрим здесь характеристики совместной сверхширокополосной оценки дальности и скорости флуктуирующей цели.

Аналогично [4] зондирующую последовательность СШПС запишем как

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

где функция $\tilde{s}(\cdot)$ описывает форму одного импульса, θ — период следования, а λ — временное положение последовательности. Параметр μ определяет точку последовательности, с которой связано ее временное положение λ. Так, при $\mu=0$ величина λ представляет собой временное положение первого импульса последовательности, при $\mu=(N-1)/2$ — временное положение середины последовательности (1), а при $\mu=(N-1)$ — временное положение последнего импульса. Полагаем, что зондирующая последовательность (1) рассеивается целью с дальностью R_0 и радиальной скоростью V_0, причем $|V_0| \ll c$, где c — скорость света.

Вначале будем полагать цель медленно флуктуирующей [6]. Тогда характеристики цели практически не изменяются за время облучения последовательностью (1) и рассеянный целью сигнал имеет вид

$$s_N(t,R_0,V_0,a_0)=\sum_{k=0}^{N-1} s[t-2R_0/c-(k-\mu)\theta(1+2V_0/c)]=$$
$$=a_0\sum_{k=0}^{N-1} f\{[t-2R_0/c-(k-\mu)\theta(1+2V_0/c)]/\tau\}. \qquad (2)$$

Здесь $a_0=\max s(t)$ — априори неизвестная амплитуда, а $t=\int_{-\infty}^{\infty} s^2(t)\mathrm{d}t/\max s^2(t)$ — эквивалентная длительность одного импульса, которая, как и в [1–5] не превышает долей наносекунды. Функция $f(\cdot)$ описывает форму одного импульса, удовлетворяет условию излучения [1] и нормирована так, что

$$\int_{-\infty}^{\infty} f(x)\mathrm{d}x=0, \qquad \max f(x)=\int_{-\infty}^{\infty} f^2(x)\mathrm{d}x=1. \qquad (3)$$

Пусть последовательность (2) наблюдается на фоне гауссовского белого шума $n(t)$ с односторонней спектральной плотностью N_0 и интервал наблюдения $[0,T]$ больше длительности всей последовательности, то есть $T>N\theta$. Скважность последовательности (2) полагаем не слишком малой, так что отдельные СШПС не перекрываются. Тогда логарифм функционала отношения правдоподобия (ФОП) для последовательности (2) определяется выражением [7]

$$L(R,V,a)=a\sum_{k=0}^{N-1} L_k(R,V)-a^2N\tilde{z}^2/2, \qquad (4)$$

где

$$L_k(R,V)=\frac{2}{N_0}\int_0^T x(t)f\{[t-2R/c-(k-\mu)\theta(1+2V/c)]/\tau\}\mathrm{d}t, \qquad (5)$$

$x(t)=s_N(t,R_0,V_0,a_0)+n(t)$ — реализация наблюдаемых данных, а $\tilde{z}^2=2t/N_0$ — отношение сигнал-шум (ОСШ) для одного СШПС последовательности с единичной амплитудой.

Для того, чтобы исключить влияние неизвестной амплитуды заменим ее значение на оценку максимального правдоподобия (ОМП) [5, 7]. Максимизируя с этой целью (4) по a, имеем

$$L(R,V)=\sup_a L(R,V,a)=\left[\sum_{k=0}^{N-1} L_k(R,V)\right]^2/2Nz^2. \qquad (6)$$

Согласно определению, совместные ОМП дальности и скорости медленно флуктуирующей цели запишутся как [7]

$$(\hat{R},\hat{V})=\arg\sup L(R,V). \qquad (7)$$

Подставим в (6) реализацию наблюдаемых данных и преобразуем к виду

$$L(R,V)=\left[z_\Sigma S(R,R_0,V,V_0)+N(R,V)\right]^2/2=S_a(R,R_0,V,V_0)+N_a(R,V)+1/2.$$

Здесь $z_\Sigma^2=a_0^2 N\tilde{z}^2=Nz^2$ — суммарное ОСШ для всей принимаемой последовательности (2), $z^2=a_0^2\tilde{z}^2$ — ОСШ для одного СШПС,

$$S(R,R_0,V,V_0)=\sum_{k=0}^{N-1} S_k(R,R_0,V,V_0)/N,$$

$$S_k(R,R_0,V,V_0)=S_f[2(R-R_0)/c\tau+2Q(k-\mu)(V-V_0)/c], \qquad (8)$$

$S_f(y)=\int\limits_{-\infty}^{\infty} f(x)f(x-y)\mathrm{d}x$ — нормированная сигнальная функция при оценке положения функции $f(\cdot)$ (3),

$$Q=\theta/\tau \qquad (9)$$

— скважность последовательности (1),

$$N(R,V)=\sum_{k=0}^{N-1} N_k(R,V)/\sqrt{N},$$

$$N_k(R,V)=\frac{2}{N_0}\int\limits_0^T n(t)f\{[t-2R/c-(k-\mu)\theta(1+2V/c)]/\tau\}\mathrm{d}t \qquad (10)$$

— реализации однородных гауссовских полей, первые два момента которых

$$\langle N_k(R,V)\rangle=0, \langle N_k(R_1,V_1)N_i(R_2,V_2)\rangle=0,$$

$$k\neq i, \langle N_k(R_1,V_1)N_k(R_2,V_2)\rangle=S_k(R_1,R_2,V_1,V_2),$$

$$S_a(R,R_0,V,V_0)=z_S^2\left[\sum_{k=0}^{N-1} S_k(R,R_0,V,V_0)\right]^2/2N^2, \qquad (11)$$

$N_a(R,V) = L(R,V) - \overline{L}(R,V)$ — реализация центрированного случайного поля, обладающего корреляционной функцией

$$B_a(R_1,R_2,V_1,V_2) = \langle N_a(R_1,V_1) N_a(R_2,V_2) \rangle = z_\Sigma^2 S(R_1,R_2,V_1,V_2) \times$$
$$\times S(R_1,R_0,V_1,V_0) S(R_0,R_2,V_0,V_2) + S^2(R_1,R_2,V_1,V_2). \qquad (12)$$

Сигнальная функция (11) достигает максимума при $R = R_0$, $V = V_0$. Следовательно, выходное ОСШ для всей последовательности (2) будет равно [7]

$$z_{aN}^2 = S_a^2(R_0,R_0,V_0,V_0)/B_a(R_0,R_0,V_0,V_0) = z_\Sigma^4/2(1+2z_\Sigma^2). \qquad (13)$$

Полагаем далее, что выходное ОСШ (13) достаточно велико, так что ОМП (7) обладает высокой апостериорной точностью. Тогда, решая систему уравнений правдоподобия методом малого параметра, в качестве которого используем величину $1/z_{aN}$ (13) находим, что в первом приближении ОМП (7) несмещенные, а вторые моменты их ошибок определяются выражениями [7]

$$D_a(\hat{R}|R_0,V_0) = \langle (\hat{R}-R_0)^2 \rangle = (S_{RV}^2 B_V - 2S_{RV} S_V B_{RV} + S_V^2 B_R)(S_R S_V - S_{RV}^2)^{-2},$$

$$D_a(\hat{V}|R_0,V_0) = \langle (\hat{V}-V_0)^2 \rangle = (S_R^2 B_V - 2S_R S_{RV} B_{RV} + S_{RV}^2 B_R)(S_R S_V - S_{RV}^2)^{-2},$$

$$\rho_a = \langle (\hat{R}-R_0)(\hat{V}-V_0) \rangle [D_a(\hat{R}|R_0,V_0) D_a(\hat{V}|R_0,V_0)]^{-1/2} =$$
$$= (S_R S_V B_{RV} - S_{RV} S_R B_V - S_{RV} S_V B_R + S_{RV}^2 B_{RV})(S_R S_V - \qquad (14)$$
$$- S_{RV}^2)^{-2} [D_a(\hat{R}|R_0,V_0) D_a(\hat{V}|R_0,V_0)]^{-1/2}.$$

Здесь обозначено

$$S_R = \partial^2 S_a(R_1,R_2,V_1,V_2)/\partial R_1^2, \quad S_V = \partial^2 S_a(R_1,R_2,V_1,V_2)/\partial V_1^2,$$
$$S_{RV} = \partial^2 S_a(R_1,R_2,V_1,V_2)/\partial R_1 \partial V_1, \quad B_R = \partial^2 B_a(R_1,R_2,V_1,V_2)/\partial R_1 \partial R_2,$$
$$B_V = \partial^2 B_a(R_1,R_2,V_1,V_2)/\partial V_1 \partial V_2, \; B_{RV} = \partial^2 B_a(R_1,R_2,V_1,V_2)/\partial R_1 \partial V_2, \qquad (15)$$

причем все эти производные вычисляются при $R_1 = R_2 = R_0$, $V_1 = V_2 = V_0$.

Дифференцируя согласно (15) функции (11), (12) и подставляя результат в (14) получаем характеристики сверхширокополосной совместной ОМП дальности и скорости медленно флуктуирующей цели

$$D_a(\hat{R}|R_0,V_0) = \frac{\tau^2 c^2}{4d^2 z^2} \frac{N^2 - 1 + 12[(N-1)/2 - \mu]^2}{N(N^2-1)}, \qquad (16)$$

$$D_a(\hat{V}|R_0,V_0) = 3c^2/d^2 z^2 Q^2 N(N^2-1), \qquad (17)$$

$$\rho_a = [\mu - (N-1)/2]/\sqrt{(N^2-1)/12 + [(N-1)/2 - \mu]^2},$$

где $d^2 = \int\limits_{-\infty}^{\infty} [\mathrm{d}f(x)/\mathrm{d}x]^2 \,\mathrm{d}x$, а Q — скважность (9).

На примере медленно флуктуирующей цели рассмотрим влияние априорного незнания ее скорости на точность совместной ОМП дальности при априори известной скорости

$$D_a(\hat{R}|R_0) = B_R / S_R^2 = \tau^2 c^2 / 4d^2 z^2 N \tag{18}$$

и дисперсию раздельной ОМП скорости при априори известной дальности

$$D_a(\hat{V}|V_0) = B_V / S_V^2 = c^2 / 4d^2 z^2 Q^2 N\{(N^2-1)/12 + [(N-1)/2 - \mu]^2\}. \tag{19}$$

Согласно (18) точность раздельной ОМП дальности не зависит от того, с какой точкой последовательности (1) или (2) связано ее временное положение, то есть не зависит от выбора μ. В то же время точность раздельной ОМП скорости, согласно (19), существенно зависит от выбора μ. Очевидно, нецелесообразно связывать временное положение последовательности (1) с какой-либо точкой за пределами интервала существования последовательности СШПС. Поэтому будем считать, что величина μ может принимать значения лишь в пределах интервала

$$\mu \in [0, N-1]. \tag{20}$$

Анализируя зависимость дисперсии раздельной ОМП скорости (19) от μ с учетом сформулированного ограничения (20), видим, что эта дисперсия достигает минимального значения, когда временное положение последовательности (1) отсчитывается по первому ($\mu = 0$) или по последнему ($\mu = N-1$) СШПС. Это минимальное значение дисперсии ОМП скорости цели при априори известной ее дальности определяется выражением

$$\min_{\mu} D_a(\hat{V}|V_0) = 3c^2 / 2d^2 z^2 Q^2 N(N-1)(2N-1). \tag{21}$$

Соответственно, максимальное значение дисперсии раздельной ОМП скорости достигается при величине

$$\mu = (N-1)/2, \tag{22}$$

то есть когда временное положение последовательности связано с ее серединой. Это максимальное значение дисперсии раздельной ОМП скорости запишется как

$$\max_{\mu} D_a(\hat{V}|V_0) = 3c^2 / d^2 z^2 Q^2 N(N^2-1). \tag{23}$$

Из (21), (23) следует, что максимальное изменение в точности раздельной оценки ОМП скорости в зависимости от выбора точки отсчета временного положения последовательности СШПС можно охарактеризовать отношением

$$\chi_V = \max_{\mu} D_a(\hat{V}|V_0) / \min_{\mu} D_a(\hat{V}|V_0) = 2(2N-1)/(N+1). \quad (24)$$

Это отношение изменяется от значчения $\chi_V = 2$ при $N = 2$, то есть для минимальной последовательности состоящей из двух СШПС, до значения $\chi_V = 4$, для последовательности с большим числом СШПС, то есть при $N >> 1$.

Согласно (17) точность совместной оценки скорости при априори неизвестной дальности не зависит от того, с какой точкой последовательности связано ее временное положение, то есть не зависит от выбора μ. Отметим так же, что дисперсия совместной оценки скорости цели при неизвестной дальности (17) совпадает с максимальным значением (23) дисперсии раздельной оценки скорости при априори известной дальности. В то же время, точность совместной оценки дальности цели при априори неизвестной ее скорости, согласно (16), существенно зависит от выбора μ. Анализируя зависимость дисперсии совместной оценки дальности (16) от μ с учетом интервала (20) определения μ видим, что эта дисперсия принимает минимальное значение, когда временное положение последовательности (1) связано с серединой последовательности, то есть μ выбирается согласно (22). Это минимальное значение дисперсии совместной оценки дальности при априори неизвестной скорости цели определяется выражением

$$\min_{\mu} D_a(\hat{R}_0|R_0, V_0) = \tau^2 c^2 / 4d^2 z^2 N, \quad (25)$$

что совпадает с дисперсией (18) раздельной оценки дальности при априори известной скорости цели. Соответственно, максимальное значение дисперсии совместной оценки дальности при априори неизвестной скорости цели достигается, когда временное положение последовательности (1) отсчитывается по первому ($\mu = 0$) или по последнему СШПС ($\mu = N-1$) последовательности. Это максимальное значение дисперсии оценки дальности определяется выражением

$$\max_{\mu} D_a(\hat{R}|R_0, V_0) = \tau^2 c^2 (2N-1) / 2d^2 z^2 N(N+1). \quad (26)$$

Из (25), (26) следует, что максимальное изменение в точности совместной оценки дальности при априори неизвестной скорости цели, в зависимости от выбора точки отсчета временного положения последовательности СШПС, можно охарактеризовать отношением

$$\chi_R = \max_{\mu} D_a(\hat{R}_0|R_0, V_0) / \min_{\mu} D_a(\hat{R}_0|R_0, V_0) = 2(2N-1)/(N+1), \quad (27)$$

которое совпадает с (24).

Найдем, теперь проигрыш в точности совместных оценок дальности и скорости медленно флуктуирующей цели вследствие незнания соответственпо скорости и дальности. Сопоставляя (16), (17) и (18), (19) ухудшение точности оценивания дальности и скорости можно охарактеризовать отношением

$$\chi=\frac{D_a(\hat{R}|R_0,V_0)}{D_a(\hat{R}|R_0)}=\frac{D_a(\hat{V}|R_0,V_0)}{D_a(\hat{V}|V_0)}=1+\frac{12[(N-1)/2-\mu]^2}{N^2-1}. \qquad (28)$$

Отсюда следует, что незнание дальности цели при оценке ее скорости и, соответственно, незнание скорости при оценке дальности приводит в общем случае к снижению точности совместных оценок по сравнению с раздельными. При этом проигрыш (28) в точности оценок заметно зависит от выбора параметра μ, определяющего точку последовательности (1) с которой связано ее временное положение. Очевидно, максимальный проигрыш достигается при $\mu=0$ или $\mu=N-1$ и равен $\chi_{\max}=2(2N-1)/(N+1)$, что совпадает с (24) и (27). Если же временное положение последовательности отсчитывается от ее середины, то есть μ определяется из (22), то согласно (28) $\chi=1$ и проигрыш в точности оценок отсутствует.

Полученные результаты позволяют сформулировать рекомендации по выбору точки отсчета μ временного положения последовательности (1) СШПС при совместной и раздельной оценке дальности и скорости медленно флуктуирующей цели. Именно, при раздельной оценке скорости цели, когда дальность априори известна, следует выбирать $\mu=0$ или $\mu=N-1$, что обеспечивает минимальное значение дисперсии (21) оценки скорости. Если необходимо оценивать скорость цели при неизвестной дальности, то согласно (17) дисперсия совместной оценки скорости не зависит от μ и можно выбирать μ, исходя из простоты технической реализации алгоритма оценки.

В свою очередь, если оценивается дальность цели при априори известной ее скорости, дисперсия раздельной оценки дальности (18) не зависит от μ. Значит, в этом случае μ можно выбирать исходя из удобства реализации алгоритма. Если необходимо оценивать дальность цели при неизвестной скорости, то следует выбирать μ согласно (22), что обеспечивает минимальное значение дисперсии совместной оценки дальности (16) при неизвестной скорости цели.

Таким образом, для медленно флуктуирующей цели максимальная точность оценивания достигается, если при известной дальности выбирается значение $\mu=0$ или $\mu=N-1$, а при неизвестной дальности μ выбирается согласно (22). Последнее гарантирует так же отсутствие проигрыша в точности совместных оценок.

Найдем далее характеристики совместных ОМП дальности и скорости при зондировании последовательностью (1) быстро флуктуирующей цели. Тогда характеристики цели практически не изменяются за время, равное длительности одного СШПС последовательности (1), но могут существенно изменяться от одного к другому СШПС, то есть за период повторения зондирующей последовательности [6]. В результате, неизвестные амплитуды имеют разные значения для различных СШПС последовательности, рассеянной быстро флуктуирующей целью. Соответственно, рассеянный быстро флуктуирующей целью сигнал запишется как

$$s_N(t,R_0,V_0,a_{0k})=\sum_{k=0}^{N-1} a_{0k}\, f\{[t-2R_0/c-(k-\mu)\theta(1+2V_0/c)]/\tau\}, \qquad (29)$$

где a_{0k}, $k=\overline{0,N-1}$ — априори неизвестные амплитуды отдельных СШПС. Аналогично (4) логарифм ФОП для последовательности (29) имеет вид [7]

$$L(R,V,a_k)=\sum_{k=0}^{N-1} a_k[L_k(R,V)-a_k\tilde{z}^2/2]. \qquad (30)$$

Здесь $L_k(R,V)$ определяется из (5), где теперь реализация наблюдаемых данных $x(t)=s_N(t,R_0,V_0,a_{0k})+n(t)$. Для того, чтобы исключить влияние априори неизвестных амплитуд последовательности (29), заменим их значения на ОМП [5, 7]. Максимизируя с этой целью (30) по всем a_k, $k=\overline{0,N-1}$, имеем

$$L_F(R,V)=\sup_{a_k} L(R,V,a_k)=\sum_{k=0}^{N-1} L_k^2(R,V)/2\tilde{z}^2. \qquad (31)$$

В результате, аналогично (7), совместные ОМП дальности и скорости быстро флуктуирующей цели определяются по положению наибольшего максимума функционала (31).

Для расчета характеристик ОМП подставим в (31) реализацию наблюдаемых данных и преобразуем к виду

$$L_F(R,V)=\sum_{k=0}^{N-1}[z_k S_k(R,R_0,V,V_0)+N_k(R,V)]^2/2= \qquad (32)$$
$$=S_F(R,R_0,V,V_0)+N_F(R,V)+N/2.$$

Здесь $z_k^2=a_{0k}^2\tilde{z}^2$ — ОСШ для k-го СШПС последовательности (29),

$$S_F(R,R_0,V,V_0)=\sum_{k=0}^{N-2} z_k^2 S_k^2(R,R_0,V,V_0)/2 \qquad (33)$$

— сигнальная функция, $N_F(R,V)=L_F(R,V)-L_F(R,V)$ — шумовая функция, которая центрирована и обладает корреляционной функцией

$$B_F(R_1,R_2,V_1,V_2)=\langle N_F(R_1,V_1)N_F(R_2,V_2)\rangle=$$
$$=\sum_{k=0}^{N-1} S_k((R_1,R_2,V_1,V_2)[z_k^2 S_k(R_1,R_0,V_1,V_0)\times$$

$$\times S_k(R_2,R_0,V_2,V_0)+S_k(R_1,R_2,V_1,V_2)/2]. \quad (34)$$

Остальные обозначения в (32)–(34) соответствуют (8)–(10). Сигнальная функция (33) достигает максимума при $R=R_0, V=V_0$. Следовательно, выходное ОСШ для всей последовательности (29) будет равно [7]

$$\begin{aligned} z_F^2 &= S_F^2(R_0,R_0,V_0,V_0)/B_F(R_0,R_0,V_0,V_0)= \\ &= z_F^4/2(N+2z_F^2)=z_F^2 z_m^2/2(1+2z_m^2), \end{aligned} \quad (35)$$

где

$$z_F^2=\tilde{z}^2\sum_{k=0}^{N-1}a_{0k}^2=\sum_{k=0}^{N-1}z_k^2,$$

а

$$z_m^2=z_F^2/N=\sum_{k=0}^{N-1}z_k^2/N \quad (36)$$

— среднее ОСШ для одного СШПС последовательности (29).

Полагаем далее, что выходное ОСШ (35) для последовательности (29) достаточно велико при любых z_m^2 (36), так что совместная ОМП дальности и скорости быстро флуктуирующей цели обладает высокой апостериорной точностью. Тогда, решая систему уравнений правдоподобия методом малого параметра, в качестве которого используем величину $1/z_{FN}$ (35) находим, что в первом приближении ОМП дальности и скорости быстро флуктуирующей цели несмещенные, а вторые моменты их ошибок определятся выражениями (14) при подстановке в них функций (33) и (34) вместо (11) и (12). Дифференцируя, согласно (15), функции (33), (34) и подставляя результат в (14) получаем характеристики сверхширокополосной совместной ОМП дальности и скорости быстро флуктуирующей цели

$$\begin{aligned} D_F(\hat{R}|R_0,V_0)&=c^2\tau^2[\sigma^2(k)+(m_1-\mu)^2][4d^2z_m^2N\sigma^2(k)]^{-1}[1+\{\sigma^4(k)+ \\ &+[\sigma^2(k)+(m_1-\mu)^2][m_1-(N-1)/2]^2+ \\ &+(N^2-1)(m_1-\mu)^2/12\}\{z_m^2\sigma^2(k)[\sigma^2(k)+(m_1-\mu)^2]\}^{-1}], \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} D_F(\hat{V}|R_0,V_0)&=c^2[4d^2Q^2z_m^2N\sigma^2(k)^{-1}]^{-1}[1+\{(N^2-1)/12+ \\ &+[m_1-(N-1)/2]^2\}z_m^{-2}\sigma^{-2}(k)], \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \rho_F&=-c^2t[4d^2Q^2z_m^2N\sigma^2(k)]^{-1}[m_1-(N-1)/2+\{[(N-1)/2-\mu]\times \\ &\times(2N^2-3N+1)/6+2\mu[m_1-(N-1)/2]+[\sigma^2(k)+(m_1-\mu)^2][m_1- \\ &-(N-1)/2]\}z_m^{-2}\sigma^{-2}(k)][D_F(\hat{R}|R_0,V_0)\times D_F(\hat{V}|R_0,V_0)]^{-1/2}. \end{aligned}$$

Здесь $\sigma^2(k)=m^2-m_1^2$, а $m_n=\sum_{k=0}^{N-1}P(k)k^n$. Величина $P(k)=\sum_{k=0}^{N-1}P(k)k^n$ и характеризует распределение суммарной энергии принятой последовательности (29) по ее отдельным СШПС.

Для определения потерь в точности совместных ОМП дальности и скорости быстро флуктуирующей цели вследствие априорного незнания амплитуд отдельных СШПС последовательности (29), приведем характеристики совместных ОМП при априори известных амплитудах СШПС последовательности (21). Согласно [4], при априори известных амплитудах дисперсии ОМП дальности и скорости, а так же их коэффициент корреляции запишутся в виде

$$D_0(\hat{R}|R_0,V_0)=c^2\tau^2[s^2(k)+(m_1-\mu)^2]/4d^2z_m^2N\sigma^2(k),\ D_0(\hat{V}|R_0,V_0)=$$
$$=c^2/4d^2Q^2z_m^2N\sigma^2(k),\ \rho_0=(\mu-m_1)/\sqrt{\sigma^2(k)+(m_1-\mu)^2}.$$

Относительное увеличение дисперсий совместных ОМП дальности и скорости быстро флуктуирующей цели вследствие априорного незнания амплитуд отдельных СШПС последовательности (29) можно охарактеризовать величинами

$$k_R=[D_F(\hat{R}|R_0,V_0)-D_0(\hat{R}|R_0,V_0)]D_0^{-1}(\hat{R}|R_0,V_0)=$$
$$=z_m^{-2}\{\sigma^4(k)+[\sigma^2(k)+(m_1-\mu)^2][m_1-(N-1)/2]^2+ \tag{37}$$
$$+(N^2-1)(m_1-\mu)^2/12\}\{\sigma^2(k)[\sigma^2(k)+(m_1-\mu)^2]\}^{-1},$$

$$k_V=[D_F(\hat{V}|R_0,V_0)-D_0(\hat{V}|R_0,V_0)]D_0^{-1}(\hat{V}|R_0,V_0)=z_m^{-2}\sigma^{-2}(k)\times \tag{38}$$
$$\times\{(N^2-1)/12+[m_1-(N-1)/2]^2\}.$$

Из (37), (38) следует, что при большом среднем ОСШ для одного импульса z_m^2 (36) незнание амплитуд СШПС последовательности (29) практически не влияет на точность совместных ОМП дальности и скорости. Действительно, если z_m^2 велико, то ОМП неизвестных амплитуд, которые используются при синтезе ОМП дальности и скорости в (31), обладают высокой апостериорной точностью, что в значительной степени компенсирует априорное незнание амплитуд. Однако, при малых значениях z_m^2 проигрыш в точности совместных ОМП дальности и скорости может быть значительным. Причем этот проигрыш возрастает с уменьшением z_m^2. Кроме того, из (37), (38) следует, что проигрыш в точности совместных ОМП дальности и скорости быстро флуктуирующей цели зависит от характера распределения $P(k)$ суммарной энергии последовательности (29) по отдельным СШПС.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

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

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

3. *Бункин Б. В., Кашин В. А.* Особенности, проблемы и перспективы субнаносекундных видеоимпульсных РЛС // Радиотехника. — 1995. — № 4–5. — С. 128 — 133.

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

5. *Трифонов А. П., Беспалова М. Б.* Эффективность сверхширокополосной оценки дальности флуктуирующей цели // Радиоэлектроника. — 2000. — №9. — С. 3 — 12. (Изв. вузов).

6. *Сосулин Ю. Г.* Теоретические основы радиолокации и радионавигации. — М.: Радио и связь, 1992 — 304 с.

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

Воронежский гос. ун-т

Поступила в редакцию 26.05.05.

УДК 621.391

ЕЛИСЕЕВ А. В.

АЛГОРИТМ ЛИНЕЙНОЙ ФИЛЬТРАЦИИ, УСТОЙЧИВЫЙ К СИНГУЛЯРНЫМ ОШИБКАМ

Решена задача линейной дискретной фильтрации при наличии в канале наблюдения кусочно-непрерывных помех, имеющих конечное число разрывов первого рода на всем отрезке наблюдения и описываемых на интервалах непрерывности степенными полиномами со случайными коэффициентами. Рассмотрен иллюстративный пример.

Известно [1, 2], что одним из перспективных направлений развития теории и практики оценивания и идентификации параметров случайного процесса является использование алгоритмов оптимальной (субоптимальной) фильтрации. Наиболее простые технические решения имеют алгоритмы линейной фильтрации, которые широко применяются на практике, например, в аппаратуре потребителей спутниковой навигационной системы GPS/ГЛОНАСС [2]. Данные фильтры эффективны, когда в канале измерения присутствует только флуктуационная ошибка [3]. Однако реальные измерения могут сопровождаться и другими типами ошибок, например, динамическими ошибками с известной структурой их математической модели и неизвестными параметрами (сингулярные ошибки) [4, 5]. Еще более сложной является задача оценивания при наличии в измерениях ошибок, подобных описанным выше, но со случайной сменой структур, принадлежащих некоторому априорно заданному мно-