

# АДАПТИВНОЕ УПРАВЛЕНИЕ СОПРОВОЖДЕНИЕМ ОБЪЕКТОВ В РАЗНЕСЕННЫХ РЛС ПРИ ТЕНЕВОМ РАССЕЙАНИИ

Г. Л. АЙВАЗЯН

Постоянно возрастающие требования к объему и качеству радиолокационной информации, помехозащищенности, живучести и надежности радиолокационных станций (РЛС) неуклонно повышают интерес к теории и технике многопозиционных радиолокационных систем (МПРЛС). Объединение РЛС в многопозиционные системы приводит к улучшению характеристик разнесенных систем благодаря более полному извлечению информации из пространственно - временной структуры радиолокационных сигналов [1,2].

Разработка и создание в последние годы МПРЛС различного назначения, обширная публикация в периодической печати материалов по МПРЛС свидетельствуют о том, что многопозиционным системам придается важное значение как одному из наиболее перспективных направлений развития современной радиолокации.

Отличительной особенностью этих систем является совместная обработка получаемой с разнесенных позиций радиолокационной информации, благодаря чему достигаются основные преимущества МПРЛС и реализуются характеристики, которые не под силу моностатическим РЛС. Кроме того, использование информационной и структурной избыточности МПРЛС служит существенным резервом по повышению точности, надежности и живучести систем, расширяет масштабы обслуживаемого пространства и повышает эффективность его использования [3-5].

Вместе с тем принципиально новые возможности открываются при функционировании МПРЛС в режиме теневого рассеяния. Явление теневого рассеяния, наблюдаемое в разнесенных системах при больших бистатических углах, приводит к многократному возрастанию бистатической эффективной пло-

щади рассеяния (ЭПР) радиолокационных целей [6-8]. На практике увеличение бистатической ЭПР целей может быть использовано для дополнительного улучшения энергетических, точностных и информационных характеристик многопозиционных РЛС, а также для повышения качества решения радиолокационных задач.

При обработке траекторной информации в разнесенных РЛС в режиме теневого рассеяния можно достичь выигрышей в объемах выборки по сравнению с моностатическими РЛС или бистатическими РЛС, функционирующими в обычном нетеновом режиме. Вместе с тем сильная зависимость ЭПР от изменений бистатического угла в режиме теневого рассеяния может привести к большим энергетическим (временным) затратам на этапе сопровождения объектов по фиксированному количеству обрабатываемых импульсов, поскольку это количество может оказаться избыточным для случаев, когда амплитуда радиолокационного сигнала выше минимально допустимой, гарантирующей обеспечение требуемых погрешностей измерения.

Наряду с этим априорная неопределенность в ориентации радиолокационных объектов относительно структуры МПРЛС, сложность и непредсказуемость состояния внешней среды, а также ограниченность энергетических ресурсов приводят к необходимости организации адаптивного управления сопровождением объектов для минимизации временных (энергетических) затрат на обновление координат в процессе измерений.

Рассмотрим адаптивное управление процессом сопровождения объектов в разнесенных РЛС при теновом рассеянии, оптимизируемое по критерию минимизации затрат энергетических ресурсов. В этом случае в качестве управляемых параметров можно использовать объем пачки зондирующих сигналов  $N_c$  и число точек локации  $N_l$  на измерительном участке траектории.

При равнодискретных и равноточных измерениях на этапе фильтрации параметров траектории объектов

$$\mathbf{s}_T^2 = f(N_l) \mathbf{s}_T^2 \quad (1)$$

где  $S_F^2$  - дисперсия сглаженной координаты,  
 $S_r^2$  - дисперсия одиночного измерения координаты,  
 $f(N_L)$  - функция, определяемая формой траектории объекта [9].

С другой стороны, для дисперсии измерения координаты в предположении, что она определяет потенциальную точность радиолокационных измерений, имеем

$$S_r^2 = \frac{V}{\rho N_c} \quad (2)$$

где  $\rho$  - отношение сигнал / шум по мощности для одного импульса,

$V$  - величина, включающая в себя параметры РЛС, несущественные для проводимого здесь анализа. Подставляя выражение (2) в (1) получим:

$$S_F^2 = \frac{f(N_L)V}{\rho N_c} \quad (3)$$

Полученное уравнение связывает параметры  $N_c$  и  $N_L$ , определение которых позволяет оценить энергетические затраты.

При адаптивном управлении сопровождением, обеспечивающем равномерность радиолокационных измерений в отдельных точках траектории объекта, величину  $N_L$  можно оценить из (1) по заданному отношению  $S_F^2 / S_r^2$  и управление вести только по параметру  $N_c$ . Тогда затраты энергии можно определить как

$$Q = \sum_{i=1}^{N_L} N_{ci} \quad (4)$$

где  $N_{ci}$  - объем пачки зондирующих сигналов в  $i$ -й точке траектории объекта, обеспечивающий требуемую точность измерения.

Накопление  $N_c$  сигналов обеспечивает достижение порогового отношения сигнал / шум  $q_m^2$ :

$$N_{\sigma_i} \rho_i = q_{\Sigma}^2 \quad (5)$$

Учитывая требование равноточности измерений, можем записать

$$N_{\sigma_i} \rho_i = N_m \rho_m \quad (6)$$

где  $N_m$  - максимальный объем пачки зондирующих сигналов, обеспечивающий пороговое отношение сигнал / шум. Из (6) следует, что

$$N_{\sigma_i} = N_m \frac{\rho_m}{\rho_i} \quad (7)$$

Подставляя (6) в (4), получим

$$Q = \sum_{i=1}^{N_{\Sigma}} \frac{N_m \rho_m}{\rho_i} \quad (8)$$

Согласно основному уравнению радиолокации отношение сигнал/шум по мощности пропорционально ЭПР радиолокационного объекта  $\sigma$  [10,11]

$$q^2 = A \sigma$$

где  $A$  включает в себя параметры РЛС и внешние по отношению к РЛС условия наблюдения, несущественные для проводимого здесь анализа. Поэтому для  $q_B^2$ , при прочих равных параметрах бистатической и эквивалентной моностатической систем, когда  $A_B = A_m$  будем иметь

$$q_B^2 = \frac{\sigma_B}{\sigma_m} q_m^2 \quad (9)$$

где  $q_B^2$  - отношение сигнал / шум по мощности в бистатической системе, функционирующей в условиях теневого рассеяния,

$q_m^2$  - отношение сигнал/шум в эквивалентной моностатической системе,

$\sigma_b$  - бистатистическая ЭПР радиолокационного объекта,

$\sigma_m$  - моностатическая ЭПР радиолокационного объекта.

Учитывая соотношение (9), равенство (8) можно переписать в виде

$$Q = \sum_{i=1}^{M_i} \frac{N_m \sigma_m}{\sigma_i(\theta_i)} \quad (10)$$

Для средних значений бистатистической ЭПР радиолокационного объекта произвольной формы имеем [7]

$$\sigma_b = \frac{\lambda \bar{l}}{\pi^2 \beta^2}, \quad \beta > \beta^* \quad (11)$$

$$\beta^* = \frac{\lambda}{\pi} \left( \frac{\bar{l}}{4 S} \right)^{1/3} \quad (12)$$

где

$\beta^*$  - угол, определяющий границу между главным лепестком и боковыми лепестками диаграммы рассеяния в случае бистатистической радиолокации,

$\beta$  - угол, дополняющий бистатистический угол рассеяния  $\bar{\beta}$  до  $180^\circ$  ( $\beta = \pi - \bar{\beta}$ ),

$\bar{l}$  - средняя длина теневого контура объекта,

$S$  - площадь плоской фигуры, ограниченной кривой раздела освещенной и теневой частей объекта,

$\lambda$  - длина волны.

Средняя ЭПР обратного рассеяния выпуклого объекта произвольной формы равна [7,12]

$$\sigma_m = \frac{S_p}{4} \quad (13)$$

где  $S_p$  - площадь полной поверхности радиолокационного объекта.

Из (10) на основании (11) и (13) получим

$$Q = \sum_{i=1}^{N_n} \frac{\pi^2 \beta_i^2 S_n N_m}{4\Delta T} \quad (14)$$

Выигрыш в затратах энергии, обеспечиваемый адаптивной процедурой сопровождения объектов в бистатической РЛС при теновом рассеянии по сравнению с неадаптивным методом, будет равен

$$\frac{Q'}{Q} = \frac{N_m N_n}{\sum_{i=1}^{N_n} \frac{\pi^2 \beta_i^2 S_n N_m}{4\Delta T}} \quad (15)$$

или

$$\frac{Q'}{Q} = \frac{N_n}{\sum_{i=1}^{N_n} \frac{\pi^2 \beta_i^2 S_n}{4\Delta T}} \quad (16)$$

Таким образом, процедура адаптации заключается в следующем: задается отношение дисперсий  $S_r^2 / S_T^2$  и по формуле (1) определяется величина  $N_n$ . Затем по пороговому значению  $q_n^2$  на основании (5), (6) и (7) вычисляются  $N_m$  и  $N_{сг}$ , после чего по формуле (4) или (14) можно подсчитать затраты энергии  $Q$ .

Заметим, что описанная процедура справедлива и для оптимизации процессов измерений на этапе экстраполяции параметров траекторий объектов. Однако в этом случае функция  $f(N_n)$  в (1) заменяется на  $f^i(N_n, P)$ , где  $P$  - интервал экстраполяции, задаваемый заранее.

Блок - схема системы адаптивного управления сопровождением объектов в режиме теневого рассеяния приведена на рис.1. Последовательность сигналов  $x_i$ , соответствующая данной точке траектории  $N_n$  радиолокационного объекта поступает на измеритель координаты (блок 1) и интегратор (блок 2), выходной сигнал которого сравнивается с пороговым уровнем  $U_n$  в пороговом блоке 4. При превышении порогового уровня, свидетельствующего об измерении координаты с допустимой погрешностью  $S_r^2$ , в блоке 4 вырабатываются сигналы, разрешающие считывание координаты (блок 3) и сигнализирующие об окон-

чании измерений ( сигнал СОИ) в точке  $N_{\text{ли}}$ .

Для оценки эффективности адаптивного управления сопровождением радиолокационных объектов в режиме теневого рассеяния было проведено моделирование на основе описанной выше процедуры. Моделировались процессы фильтрации и экстраполяции координаты

суммарной дальности объекта конической формы в бистатической радиолокационной системе [9,13,14].

Для радиолокационного объекта конической формы с радиусом основания  $a$ , полууглом при вершине  $\alpha$  и высотой  $h$  имеем [7]

$$\bar{l} \cong 2a \left[ 1,2 + \frac{1}{\sin \alpha} \left( 1 - \frac{\cos^2 \alpha}{6} \right) \right] \quad (17)$$

$$S_{\text{н}} = \pi a \left[ a + (a^2 + h^2)^{1/2} \right] \quad (18)$$

Выражение (16) для выигрыша примет вид

$$\frac{Q'}{Q} = \frac{N_{\text{ли}}}{\sum_{i=1}^{N_{\text{ли}}} \frac{a \pi^2 \beta^2 \left[ a + \sqrt{a^2 + \left( \frac{h}{a} \right)^2} \right]^2}{4h \left( 2a + \frac{a - \cos^2 \alpha}{\sin \alpha} \right)}} \quad (19)$$

Траектория радиолокационного объекта принималась линейной, образующей различные углы с линией базы и проходящей через ее середину.

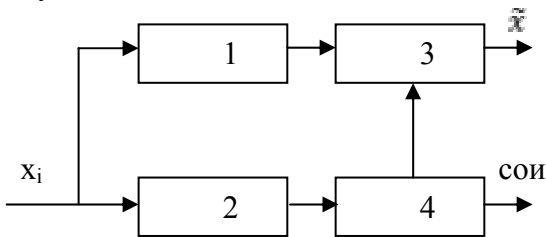


Рис.1 Блок - схема системы адаптивного управления сопровождением объектов при теновом рассеянии: 1 - измеритель координаты, 2-интегратор, 3-блок считывания координаты, 4-пороговый блок.

В этом случае соотношение (1) будет иметь вид

$$S_p^2 = \frac{2(2N_n - 1)}{N_n(N_n + 1)} S_r^2 \quad (20)$$

для этапа фильтрации и для этапа экстраполяции.

$$S_p^2 = \frac{2[(N_n - 1)(2N_n - 1) + \sigma_p(N_n - 1) + \sigma_p^2]}{N_n(N_n + 1)} S_r^2 \quad (21)$$

Моделирование проводилось для  $S_p^2 / S_r^2 = 0,5$ ,  $\lambda / a = 0,5$ ,  $h / a = 6$ ,  $p = 1$ . Результаты моделирования показывают, что выигрыши в временных (энергетических) затратах при адаптивной фильтрации по сравнению с фильтрацией без адаптации составляет 5 - 8 дБ в зависимости от угла наклона траектории объекта к линии базы бистатической РЛС. При экстраполяции координаты выигрыши составляют 2 - 3,5 дБ.

Таким образом, применение адаптивного управления сопровождением объектов в разнесенных системах при теневого рассеянии дает заметный выигрыш в временных (энергетических) затратах на обновление координат в процессе радиолокационных измерений.

**Ключевые слова:** *адаптивное сопровождение, бистатическая радиолокация, многопозиционная радиолокация, теневого рассеяние.*

## ЛИТЕРАТУРА

1. **S. R. Doughty.** Development and Performance Evaluation of a Multistatic Radar System. University College London, 2008, pp.213.
2. **C. J. Baker.** An Introduction To Multistatic Radar. College of Engineering and Computer Science, ANU, 2007, pp.20.
3. **V. S. Chernyak.** Fundamentals of Multisite Radar Systems: Multistatic Radars and Multiradar Systems, Gordon and Breach Science Publishers, 1998, pp.475.
4. **C. J. Baker, A.L.Hume.** Multistatic Radar Sensing, IEEE

- Aerospace and Electronic Systems Magazine, 2003, Volume 18-2, pp.3-6.
5. **W. Beide.** The Nature of Bistatic and Multistatic Radar, International Conference on Radar, 2001, pp.15-18.
  6. **В. Я. Аверьянов.** Разнесенные радиолокационные станции и системы. - Минск, Наука и Техника, 1978. -250с.
  7. **А. К. Черемисов,** Статистические характеристики эффективной площади рассеяния тела в бистатической радиолокации. - М.: Радиотехника и Электроника, 1987, N 12, с. 2516-2524.
  8. **J. I. Glaser Bistatic** RCS of complex objects near forward scatter, IEEE Trans.AES,1985, N1, pp.70-78.
  9. **С. З. Кузьмин,** Основы проектирования систем цифровой обработки радиолокационной информации.- М.: Радио и Связь, 1986. -352с.
  10. **H. Meikle.** Modern Radar Systems, Artech House, 2001, pp. 563.
  11. **В. М. Mahafza,** Radar Systems Analysis and Desidn using MATLAB, Chapman-Hall/CRC, 2000, pp. 453.
  12. **В. О. Кобак,** Радиолокационные отражатели.-М.: Сов. Радио, 1975. -248с.
  13. **N. J. Willis,** Bistatic Radar, SciTech Publishing Inc, 2005, pp.337
  14. **N. J Willis,** H.D. Griffiths. Advances in Bistatic Radar, Sci-Tech Publishing Inc,2007, pp.493

## Գ. Լ. ԱՅՎԱԶՅԱՆ

**ՕՐՅԵԿՏՆԵՐԻ ՈՒՂԵԿՑՄԱՆ ԱԴԱՊՏԱՑՎԱԾ  
ԿԱՌԱՎԱՐՈՒՄԸ ՏԱՐԱՆՁԱՏՎԱԾ ՌԱԴԻՈԼՈԿԱՑԻՈՆ  
ՀԱՍՏԱԿԱՐԳԵՐՈՒՄ ՍՏՎԵՐԱՅԻՆ ՑՐՄԱՆ ԴԵՊԸՈՒՄ**

*Ամփոփում*

Հիմնավորված է տարանջատված ռադիոլոկացիոն համակարգերում ստվերային ցրման դեպքում օբյեկտների ուղեկցման

ադապտացված կառավարման անհրաժեշտությունը: Նկարագրված է ադապտացված չափումների կազմակերպման գործընթացը, և ներկայացված են գումարային հեռավորության կոորդինատի էքստրապոլյացիայի և գտման գործողությունների մոդելավորման արդյունքները, որոնք հաստատում են ռադիոլոկացիոն օբյեկտների ադապտացված ուղեկցման արդյունավետությունը: Ստացված արդյունքները ցույց են տալիս, որ ադապտացված չափումների դեպքում նվազեցվում են օբյեկտների կոորդինատների թարմացման ժամանակային (էներգետիկ) ծախսերը:

**Առանցքային հասկացություններ.** *ադապտացված ուղեկցում, բիստատիկ ռադիոլոկացիա, բազմադիրքային ռադիոլոկացիա, ստվերային ցրում:*

**G.L. AYVAZYAN**

## **ADAPTIVE CONTROL OF TARGET TRACKING IN SEPARATED RADARS NEAR FORWARD SCATTER**

### *Summary*

The necessity of adaptive control of measurements in separated radars by forward scatter is presented.

The procedure of adaptive measurements is described. The simulation results of extrapolation and interpolation of the total range confirming the efficiency of adaptive tracking of radar targets are given. The obtained results show that the adaptive measurements minimize the time (energy) costs to update the coordinates in the process of tracking.

**Key concepts:** *adaptive tracking, bistatic radar, multistatic radar, forward scatter.*