

ВЫБОР ПАРАМЕТРОВ СИГНАЛОВ ДЛЯ ОБЕСПЕЧЕНИЯ МАКСИМАЛЬНОЙ ПРОПУСКНОЙ СПОСОБНОСТИ МНОГОКАНАЛЬНОЙ РЛС С ФАР В РЕЖИМЕ СОПРОВОЖДЕНИЯ

И.А. Кулинич
(Харьковский университет Воздушных Сил)

Проведен анализ результатов исследований системы управления многоканальной РЛС с ФАР в режиме сопровождения. Получен алгоритм, обеспечивающий оптимальный выбор параметров сигнала, используемого для проведения радиолокационных измерений координат сопровождаемых целей, в смысле максимума пропускной способности РЛС.

системы управления, многоканальная РЛС, фазированная антенная решетка, режим сопровождения

Постановка задачи. Возрастание и усложнение задач, решаемых радиолокационными станциями (РЛС) различного назначения, приводит к необходимости повышения их пропускной способности, что возможно на основе применения многоканальных (МК) РЛС, способных одновременно вести сопровождение большого количества целей. Значительным шагом на пути развития МК РЛС стала разработка антенн нового типа – фазированных антенных решеток (ФАР), эффект многоканальности в которых обеспечивается путем временного разделения каналов [1, 2]. Как известно, применение ФАР с электрическим управлением диаграммой направленности, имеющих в сравнении с антеннами с механическим сканированием большую стоимость, оказывается оправданным лишь в том случае, когда система управления РЛС наилучшим образом использует имеющиеся возможности и получаемую информацию.

В связи с отмеченным представляет интерес вопрос построения системы управления МК РЛС, обеспечивающей ее максимальную пропускную способность в режиме сопровождения.

Основная часть. Решение задачи повышения пропускной способности МК РЛС с временным разделением каналов сводится по существу к обеспечению возможного максимального периода обновления информации по сопровождаемым целям. В качестве ограничивающих факторов при этом выступают требования предъявляемые потребителем к качеству выдаваемой информации, а именно [3]:

– требования к точности информации, определяемые величиной среднеквадратического отклонения (СКО) ошибки оценивания ξ -й координаты $\sigma_{0\xi}$;

– требования к надежности сопровождения, определяемые вероятностью ее устойчивого сопровождения (отсутствия срыва слежения) по каждой из координат P_{ξ} .

В случае раздельного сопровождения, а также адекватности модели движения и регулярности текущих измерений, указанные величины могут быть определены исходя из соотношений [4, 5]:

$$\frac{1}{\sigma_{0\xi}^2} = \frac{1}{\sigma_{\text{изм}\xi}^2} + \frac{1}{\sigma_{\text{э}\xi}^2}; \quad (1) \quad P_{\xi} = \operatorname{erf} \left\{ \frac{L_{\xi}}{2\sqrt{2}\sigma_{y\xi}} \right\}, \quad (2)$$

где $\sigma_{\text{э}\xi}$ – СКО ошибки экстраполяции ξ -й координаты; $\sigma_{\text{изм}\xi}$ – СКО ошибки текущего измерения ξ -й координаты; $\operatorname{erf}(\dots)$ – функция ошибок; L_{ξ} – размер строка сопровождения (корреляционного строка) по ξ -й координате; $\sigma_{y\xi}$ – СКО обновляющей последовательности (невязки) ξ -й координаты, определяемой из соотношения

$$\sigma_{y\xi} = \sqrt{\sigma_{\text{изм}\xi}^2 + \sigma_{\text{э}\xi}^2}.$$

Из анализа полученных в [3] результатов было установлено, что максимальная потенциальная пропускная способность МК РЛС, определяемая при условиях соответствия модели движения и регулярности проводимых текущих измерений, обеспечивается при строгом обеспечении требований как к надежности, так и к точности сопровождения, т.е. при одновременном равенстве величины СКО ошибки оценивания и вероятности устойчивого сопровождения некоторым допустимым значениям $\sigma_{0\xi\text{тр}}$ и $P_{\xi\text{тр}}$.

На основе соотношений (1), (2) отмеченное условие обеспечения максимума пропускной способности МК РЛС может быть записано аналитически в виде системы уравнений

$$\begin{cases} \sigma_{0\xi\text{тр}}^2 = \frac{\sigma_{\text{э}\xi}^2 \sigma_{\text{изм}\xi}^2}{\sigma_{\text{э}\xi}^2 + \sigma_{\text{изм}\xi}^2}; \\ \sigma_{y\xi\text{доп}}^2 = \sigma_{\text{э}\xi}^2 + \sigma_{\text{изм}\xi}^2, \end{cases} \quad (3)$$

где $\sigma_{y\xi\text{доп}}$ – допустимое значение СКО обновляющей последовательности (невязки), определяемое из соотношения

$$\sigma_{y\xi\text{доп}} = \frac{L_{\xi}}{2\sqrt{2}\operatorname{erf}^{-1}(P_{\xi\text{тр}})}.$$

Для определения параметров зондирующих сигналов РЛС, обеспечивающих заданные требования к качеству процесса сопровождения, воспользуемся мерой разрешающей способности $\delta\xi$ [6]. Как известно, размер корреляционного строба (строба сопровождения) L_ξ связан с мерой разрешающей способности $\delta\xi$ соотношением [7]

$$L_\xi = k\delta\xi, \quad (4)$$

где параметр k принимает значения в пределах $1 \dots 1,2$. Среднеквадратическое отклонение ошибки текущих измерений координат, при условии их регулярности определяется выражением [6]

$$\sigma_{\text{изм } \xi} = \frac{\delta\xi}{q}, \quad (5)$$

где q – отношение сигнал/шум по напряжению.

Подставляя (4), (5) в (3), нетрудно установить, что оптимальное, в смысле максимума пропускной способности МК РЛС, значение меры разрешения сопровождаемой координаты определяется соотношением

$$\delta\xi^* = \sigma_{0\xi\text{тр}} \frac{kq^2}{\sqrt{k^2q^2 - 8\gamma_\xi^2}}, \quad (6)$$

где $\gamma_\xi = \text{erf}^{-1}(P_{\xi\text{тр}})$.

Выражение (6) можно представить в виде

$$\delta_n^* = \frac{kq^2}{\sqrt{k^2q^2 - 8\gamma_\xi^2}}, \quad (7)$$

где $\delta_n^* = \delta\xi^*/\sigma_{0\xi\text{тр}}$ – оптимальная мера разрешающей способности, нормированная к требуемой ошибке оценивания сопровождаемой координаты.

Как следует из соотношения (7), величина δ_n^* определяется отношением сигнал/шум q и требуемой вероятностью устойчивого сопровождения $P_{\xi\text{тр}}$. Минимальное значение оптимальной меры разрешающей способности достигается при отношении сигнал/шум, равном $q_{0\xi} = 4\gamma_\xi/k$, и определяется соотношением

$$\delta\xi_{\text{min}}^* = \sigma_{0\xi\text{тр}} \frac{4\sqrt{2}\gamma_\xi}{k}. \quad (8)$$

Из соотношения (7) также следует, что δ_n^* стремится к бесконечности при приближении q к пороговому значению, определяемому выражением

$$q_{\text{пор}} = \frac{2\sqrt{2}\gamma_\xi}{k}.$$

Таким образом, в случае $q < q_{\text{пор}}$ невозможно обеспечить сопровождение цели при заданных требованиях к его надежности. Возможные пути выхода из данной ситуации могут заключаться в снижении требований к надежности сопровождения или в принятии мер по недопущению снижения отношения сигнал/шум ниже $q_{\text{пор}}$.

Как известно [6], в случае регулярности текущих измерений, мера разрешающей способности определяется параметрами используемого для измерения сигнала:

– мера разрешающей способности по дальности

$$\delta r = \frac{c\delta\tau}{2}, \quad (9)$$

где $\delta\tau = 1/\Pi$ – мера разрешающей способности по времени запаздывания; Π – ширина спектра сигнала;

– мера разрешающей способности по радиальной скорости

$$\delta v_r = \frac{\lambda\delta F}{2}, \quad (10)$$

где $\delta F = 1/T_c$ – мера разрешающей способности по частоте Доплера; T_c – длительность сигнала;

– мера разрешающей способности по углам

$$\delta\varphi = \frac{1}{l_{\text{ЭН}}}, \quad (11)$$

где $l_{\text{ЭН}}$ – эффективный нормированный размер апертуры ФАР.

Из соотношений (6), (11) следует, что оптимальное значение эффективного нормированного размера апертуры ФАР должно выбираться исходя из соотношения

$$l_{\text{ЭН}}^* = \frac{1}{\sigma_{\text{офтр}}\delta_{\text{Н}}^*}. \quad (12)$$

Аналогично, исходя из определения меры разрешающей способности по дальности и радиальной скорости, при условии постоянства энергии формируемого сигнала, выбор оптимальной ширины спектра сигнала Π^* и его длительности T_c^* должен осуществляться исходя из соотношений

$$\Pi^* = \frac{c}{2\sigma_{\text{офтр}}\delta_{\text{Н}}^*}; \quad (13) \quad T_c^* = \frac{\lambda}{2\sigma_{\text{о}v_r\text{тр}}\delta_{\text{Н}}^*}. \quad (14)$$

Как следует из соотношений (13), (14) база требуемого сигнала, в зависимости от отношения сигнал/шум q и требований, предъявляемых к качеству сопровождения по дальности и радиальной скорости, при равных требованиях к устойчивости сопровождения, определяется из соотношения

$$B^* = \frac{\lambda c}{4\sigma_{огтр}\sigma_{овтр}\delta_n^{*2}}. \quad (15)$$

На рис. 1 – 3 представлены зависимости базы, ширины спектра и длительности оптимального сигнала соответственно от отношения сигнал/шум при следующих исходных данных: $\lambda = 3 \cdot 10^{-2}$ м, $\sigma_{огтр} = 2$ м, $\sigma_{овтр} = 0,5$ м/с, $k = 1,1$. На рис. 4 представлены зависимости оптимальной меры разрешающей способности по радиальной скорости δV_r^* от отношения сигнал/шум q .

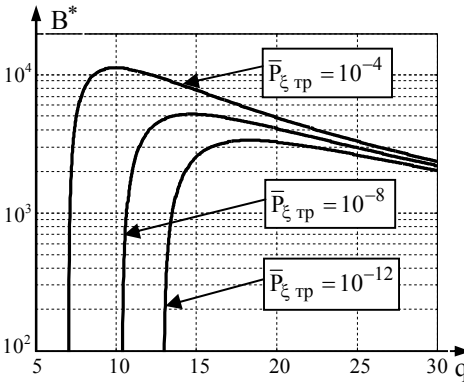


Рис. 1. Зависимость $B^*(q)$

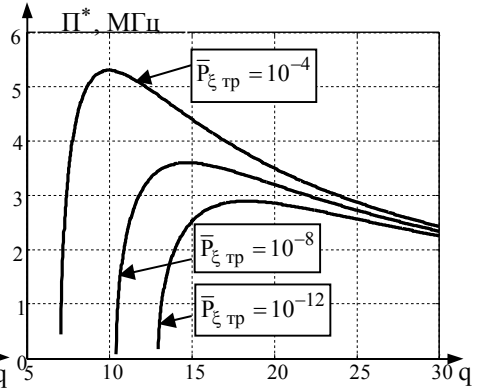


Рис. 2. Зависимость $\Pi^*(q)$

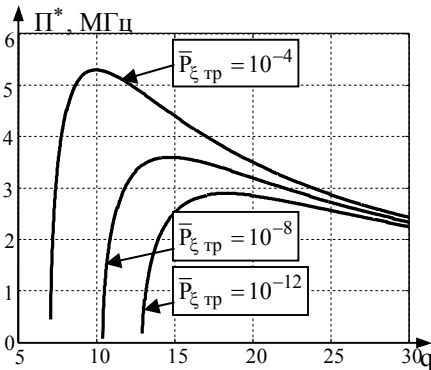


Рис. 3. Зависимость $T_c^*(q)$

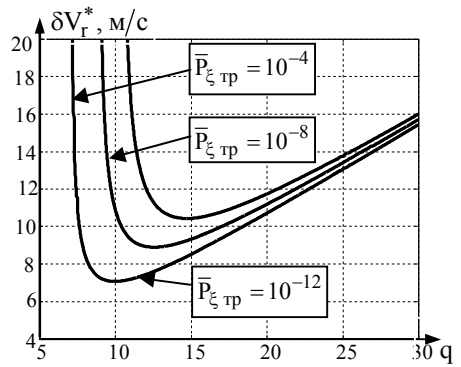


Рис. 4. Зависимость $\delta V_r^*(q)$

Как следует из анализа соотношения (6) и рис. 4, при $q \geq q_{пор}$ разрешающая способность может принимать значения от $\delta \xi_{\min}^*$, опреде-

ляемого соотношением (8), до бесконечности. Однако на практике всегда имеются ограничения и на максимальное значение меры разрешающей способности обусловленные в первую очередь, связью (4) между разрешающей способностью и размерами строка сопровождения, а также необходимостью обеспечения минимальной вероятности попадания в его пределы отметок от нескольких целей. Поэтому максимальное значение разрешающей способности $\delta\xi_{\max}$ должно быть согласовано с классом целей, для обслуживания которых предназначена МК РЛС [7].

Обобщая полученные результаты и сделанные замечания, предлагается следующий алгоритм адаптивного выбора параметров сигналов для проведения текущих измерений при сопровождении.

Исходными данными для функционирования алгоритма являются:

- величина текущего значения отношения сигнал/шум;
- требования, предъявляемые к точности и устойчивости сопровождения;
- граничные значения меры разрешения по соответствующим координатам $\delta\xi_{\max}$.

На первом этапе функционирования данного алгоритма осуществляется расчет порогового значения отношения сигнал/шум $q_{\text{пор}}$, которое сравнивается с его текущим значением q . В случае, если $q < q_{\text{пор}}$, мера разрешающей способности принимается равной максимальному допустимому значению $\delta\xi_{\max}$. Если $q > q_{\text{пор}}$, рассчитывается оптимальное нормированное значение меры разрешающей способности δ_n^* , на основе которого и требований, выдвигаемых к точности оценивания, рассчитывается оптимальная мера разрешающей способности по каждой из координат. В случае, если полученное таким образом значение меры разрешающей способности выше допустимого максимального значения, она принимается равной $\delta\xi_{\max}$, в противном случае она принимается равной рассчитанному оптимальному значению $\delta\xi^*$.

На рис. 5 представлена зависимость меры разрешения по радиальной скорости от отношения сигнал/шум (сплошная линия), полученные в результате функционирования рассмотренного алгоритма. Как следует из приведенных зависимостей, в случае $q < q_{\text{пор}}$ и $\delta V_r^* > \delta V_{r \max}$ (штриховая линия) мера разрешающей способности принимается равной $\delta V_{r \max} = 10 \text{ м/с}$. В противном случае она рассчитывается в соответствии с выражением (6). Как можно заметить, диапазон значений отношения сигнал/шум, при которых мера разрешающей способности принимает

оптимальное значение, тем больше, чем больше интервал, на котором максимальное значение меры разрешающей способности $\delta\xi_{\max}^{\xi}$ превышает ее оптимальное значением $\delta\xi^*$.

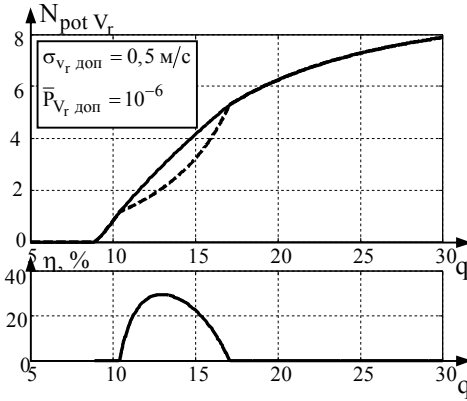


Рис. 5. Зависимость $\delta V_r(q)$

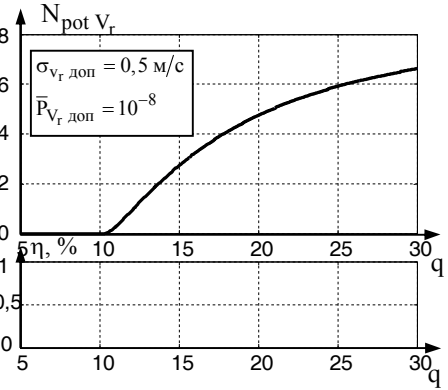


Рис. 6. Зависимости $N_{\text{pot}} V_r(q)$ и $\eta(q)$

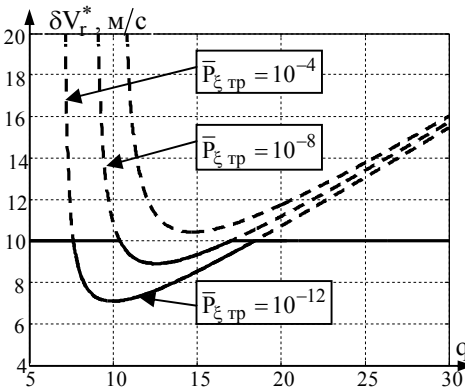


Рис. 7. Зависимости $N_{\text{pot}} V_r(q)$ и $\eta(q)$

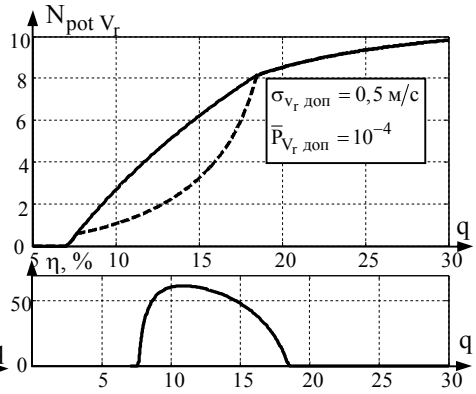


Рис. 8. Зависимость $N_{\text{pot}} V_r(q)$ и $\eta(q)$

Было проведено моделирование функционирования системы управления наблюдениями МК РЛС в режиме сопровождения с использованием рассмотренного алгоритма. На рис. 6 – 8 представлены сравнительные результаты моделирования для системы сопровождения по радиальной скорости. На верхнем графике каждого из рисунков приведены зависимости потенциальной пропускной способности от отношения сигнал/шум $N_{\text{pot}} V_r(q)$ для случая, предполагающего использование рассмотренного алгоритма (сплошная линия) и без его использования

(штриховая линия). На нижнем графике представлена зависимость, получаемого выигрыша $\eta(q)$ (в процентном соотношении) в потенциальной пропускной способности.

Как следует из сравнительного анализа рис. 5 и рис. 6 – 8, область значений отношения сигнал/шум, соответствующая повышению потенциальной пропускной способности системы, соответствует диапазону, в котором мера разрешающей способности принимает оптимальные значения.

Выводы. Исходя из полученных результатов, можно заключить:

1) применение предложенного алгоритма позволяет повысить потенциальную пропускную способность МК РЛС $N_{pot} \xi$;

2) наиболее эффективному применению рассмотренного алгоритма соответствуют наиболее сложные условия, характеризующиеся низким отношением сигнал/шум, вызванной этим сложностью обеспечения высокой надежности сопровождения, а также высокими требованиями к точности выдаваемой информации;

3) целесообразность применения данного алгоритма определяется диапазоном значений отношения сигнал/шум, при котором мера разрешающей способности принимает оптимальные значения;

4) применение данного алгоритма нецелесообразно в случае когда $\delta\xi_{min}^* \geq \delta\xi_{max}$.

ЛИТЕРАТУРА

1. Шишов Ю.А., Ворошилов В.А. Многоканальная радиолокация с временным разделением каналов. – М.: Радио и связь, 1987. – 144 с.
2. Можар М.К., Решетник В.М., Гришин И.Ю. Проблемы управления ЗРК // Наука и оборона. – 1995. – № 2. – С. 34 – 37.
3. Хисматулин В.Ш., Кулинич И.А. Выбор критерия управления наблюдениями при сопровождении нескольких целей в РЛС с ФАР // Радиоэлектронні системи та комплекси. – Х.: ХАИ. – 2003. – Вип. 3. – С. 59 – 62.
4. Леондес К.Т. Фильтрация и динамическое управление в динамических системах. – М.: Мир, 1980. – 408 с.
5. Кузьмин С.З. Основы проектирования систем цифровой обработки радиолокационной информации. – М.: Радио и связь, 1986. – 352 с.
6. Ширман Я.Д., Манжос В.Н. Теория и техника обработки радиолокационной информации на фоне помех. – М.: Радио и связь, 1981. – 340 с.
7. Фарина А., Студер Ф. Цифровая обработка радиолокационной информации. Сопровождение целей / Пер. с англ. А.М. Бочкарева, под ред. А.Н. Юрьева. – М.: Радио и связь, 1993. – 300 с.

Поступила 31.03.2005

Рецензент: доктор технических наук профессор В.Д. Карлов,
Харьковский университет Воздушных Сил.