

6. *Абросимов В.К.* Интеллектуальные методы решения конфликтных задач. – М.: Креативная экономика, 2012. – 144 с.
7. Нечеткое моделирование и управление // А. Пегат: Пер. с англ. – М.: Бином Лаборатория Знаний, 2009. – 798 с.
8. *Гончаренко В.И.* Классификация траекторий летательных аппаратов с помощью методов искусственного интеллекта // Информационно-измерительные и управляющие системы. – 2012. – № 4. – С. 54-60.

Статью рекомендовал к опубликованию д.т.н., профессор А.В. Зайцев.

Абросимов Вячеслав Константинович – Военный институт федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего профессионального образования «Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет)»; e-mail: avk787@hotmail.com; 125993, Москва, ГСП-3 А-80, Волоколамское шоссе, 4; тел.: 84991581701; д.т.н.; профессор; с.н.с.

Гончаренко Владимир Иванович – e-mail: fvo@mai.ru, vladimirgonch@mail.ru; д.т.н.; доцент.

Abrosimov Viacheslav Konstantinovich – Military Institute Federal State-Owned Educational Establishment of Higher Vocational Education «Moscow Aviation Institute (National Research University)»; e-mail: avk787@hotmail.com; 4, Volokolamskoye shosse, Moscow, A-80, GSP-3, 125993; Russia; phone: +74991581701; dr. of eng. sc.; professor; senior scientist.

Goncharenko Vladimir Ivanovich – e-mail: fvo@mai.ru, vladimirgonch@mail.ru; dr. of eng. sc.; associate professor.

УДК 621.396.96

Е.Г. Борисов, Г.М. Машков, Л.С. Турецкий

**ОРГАНИЗАЦИЯ ПРОЦЕССОВ ОБНАРУЖЕНИЯ-ИЗМЕРЕНИЯ
В АКТИВНО-ПАССИВНОЙ МНОГОПОЗИЦИОННОЙ
РАДИОЛОКАЦИОННОЙ СИСТЕМЕ С КООПЕРАТИВНЫМ ПРИЕМОМ
СИГНАЛОВ**

Рассматривается вариант организации кооперативной обработки измерительной информации в активно – пассивной радиолокационной системе. Рассмотрены варианты пространственно-временной синхронизации передающих и приемных позиций многопозиционной радиолокационной системы, которые позволяют при определенных условиях повысить вероятность обнаружения целей. Показано, что совместная обработка координатной информации позволяет повысить точность радиолокационных измерений. Получены аналитические зависимости для определения наклонных дальностей в трехпозиционной активно – пассивной радиолокационной системе с использованием избыточных дальномерных измерений.

Многопозиционная радиолокационная система; кооперативная обработка измерений; синхронизация позиций; обнаружение целей; измерение координат; метод наименьших квадратов.

E.G. Borisov, G.M. Mashkov, L.S. Turnetsky

**ORGANIZATION PROCESS DETECTION-MEASUREMENTS
IN ACTIVE-PASSIVE MULTISTATIC RADAR WITH A COOPERATIVE
SIGNAL RECEPTION**

The article discusses the option of cooperative organizations measurement information processing in active-passive radar system. The variants of the space – time synchronization of the transmitting and receiving positions multistatic radar system, which allows to under certain condi-

tions increase the probability of target detection. However, a combination treatment of the coordinate information to improve the accuracy of radar measurements. The analytical dependence for the determination of the slant range to the three-position active - passive radar system using redundant range measurements.

Multistatic radar system; cooperative analysis of the measurements; synchronization positions target detection; measuring coordinates; the method of least squares.

В настоящее время развитие радиолокационной техники направлено на достижение предельных характеристик по вероятности обнаружения малококонтрастных целей, дальности действия и точности измерения пространственных координат воздушных объектов. Наблюдается устойчивая тенденция использования сверхширокополосных (линейно-частотно, фазово и внутри импульсно-модулированных, дискретно-кодированных по частоте импульсов, многочастотных сигналов) и сверхкороткоимпульсных сигналов, с одновременным использованием сверхдлинных и монохроматических сигналов. Частотный диапазон современных РЛС охватывает длины волн от сверхдлинных до миллиметровых.

Интенсивно развиваются многофункциональные РЛС на основе активных фазированных антенных решеток (АФАР), которые в перспективе интегрируются в многорежимные многодиапазонные РЛС способные адаптироваться к фонов-целевой обстановке. Модульность построения РЛС естественным образом подразумевает пространственно распределенную структуру в виде многопозиционных РЛС активно-пассивного типа.

Интенсивное развитие технологий обработки сигналов, устройств их генерирования, систем синхронизации и передачи данных позволяют потенциально создать условия для формирования когерентного и синфазного системного пространственно-распределенного радиолокационного поля.

Повышение точности первичных измерений обычно достигается повышением отношения сигнал/помеха, за счет увеличения энергетического потенциала РЛС, применением сложных сигналов с внутримпульсной модуляцией, реализации процедур когерентного накопления и т.д. [1–5]. Использование процедур Калмановской фильтрации при реализации вторичной обработки радиолокационной информации в ряде случаев позволяет добиться требуемой точности измерений [6–7]. При организации третичной обработки радиолокационной информации точность оценки траекторной информации существенно повышается путем объединения отметок (трасс) целей от разных РЛС, принадлежащих одному объекту с учетом весовых коэффициентов, обратно пропорциональных квадратам соответствующих среднеквадратических ошибок.

Однако рассмотренным способам присущи ряд недостатков. Увеличение энергетического потенциала РЛС, особенно размещенных на движущихся носителях в ряде случаев проблематично по конструктивным соображениям. Применение сложных и широкополосных сигналов также имеют ограничения, вызванные конструктивными исполнениями устройств их формирования и сжатия.

Процедуры фильтрации параметров траектории при реализации вторичной обработки информации требуют некоторого времени, кроме того, эти алгоритмы критичны к априорной информации о гипотезе движения цели, что накладывает ограничения на их применимость.

Использование весовых коэффициентов при объединении отметок (трасс) целей по результатам измерений нескольких РЛС требует априорного знания дисперсий ошибок определения координат, либо проведения вычислительной процедуры для их оценивания, что требует времени.

Рассмотрим вариант повышения точности определения координат целей в активно-пассивной многопозиционной радиолокационной системе (АПМРЛС) с применением кооперативной обработкой локационной информации.

Кооперативность обработки радиолокационной информации в АПМПРЛС заключается в том, что все позиции системы способны принимать отраженные сигналы от целей в зоне ответственности при их облучении любой передающей позицией, а также и сигналы по данным канала радиотехнической разведки, когда сама цель является источником радиоизлучения. Такая процедура существенно увеличивает объем сигнальной и координатной информации и позволяет получить избыточные измерения суммарных дальностей и разностей расстояний, в которых содержится информация о наклонных дальностях до цели. Под избыточностью будем понимать измерения нескольких однородных физических величин (дальностей до целей, суммарных дальностей и разностей расстояний), которые связаны между собой каким либо законом, при котором искомое значение величины (дальности до цели) получают путем обработки результатов промежуточных измерений по уравнению избыточных измерений с целью повышения точности оценивания.

В работах [1, 8–9] показано, что кооперативная обработка локационной информации в МПРЛС является наиболее полной, и позволяет извлечь из сигнальной информации потенциально больший объем данных. Эта задача схожа по физическому смыслу задаче фильтрации параметров траектории, где для повышения точности оценивания координат используют несколько измерений оцениваемой величины во времени.

Рассмотрим принцип кооперативной обработки радиолокационной информации в МПРЛС активно-пассивного типа (рис. 1). Для реализации процедур кооперативной обработки локационной информации в активно-пассивной МПРЛС необходимо решить задачи пространственно-временной синхронизации хотя бы в локальной области контролируемого пространства. На рис. 2 приведен вариант работы МПРЛС при реализации гибких процедур обзора пространства, для синхронного обзора пространства с целью повышения энергетического потенциала.

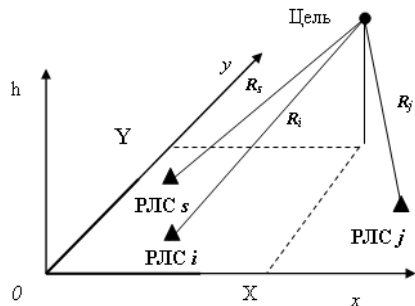


Рис. 1. Геометрия трехпозиционной активно-пассивной радиолокационной системы

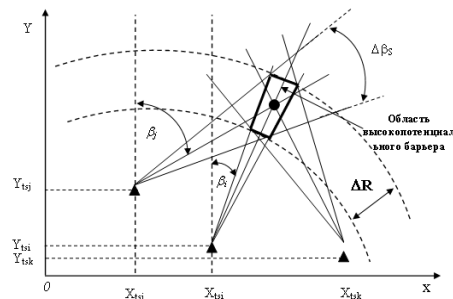


Рис. 2. Организация пространственной синхронизации зоны обзора

Относительно точки стояния основной РЛС на заданной дальности R назначается ширина зоны обнаружения ΔR , выбираемая исходя из скорости движения цели и выбранного темпа обзора $\Delta R = kV_{\max}T_0$, где V_{\max} – максимальная скорость цели, T_0 – период обзора, $k = 1, 2 \dots n$, влияющий на ширину потенциального барьера.

Угловые положения антенн дополнительных (ведомых) РЛС в азимутальной и угломестной плоскостях, дальность до центра зоны согласованного поиска определяются по зависимостям:

$$\beta_j = \arctg \left(\frac{X_i - X_{mcj}}{Y_i - Y_{mcj}} \right) = \arctg \left(\frac{R_i \sin \beta_i \cos \varepsilon_i - X_{mcj}}{R_i \cos \beta_i \cos \varepsilon_i - Y_{mcj}} \right), \quad (1)$$

$$R_j = \sqrt{(Y_i - Y_{mcj})^2 + (X_i - X_{mcj})^2 + H_i^2} = \sqrt{(R_i \cos \beta_i \cos \varepsilon_i - Y_{mcj})^2 + (R_i \sin \beta_i \cos \varepsilon_i - X_{mcj})^2 + (R_i \sin \varepsilon_i)^2}, \quad (2)$$

где R_i – дальность до центра зоны; β_i – текущий азимут ДНА основной РЛС; ε_i – текущий угол места ДНА основной РЛС; X_{mcj} , Y_{mcj} – точки стояния дополнительной РЛС на плоскости.

Скорости перемещения ДНА ведомых РЛС и строга дальности рассчитываются путем дифференцирования по времени зависимостей (1)–(2):

$$\dot{\beta}_j = \frac{(\dot{R}_i \sin \beta_i \cos \varepsilon_i + \dot{\beta}_i Y_i - \dot{\varepsilon}_i H_i \sin \beta_i)(Y_i - Y_{mcj})}{(Y_i - Y_{mcj})^2 + (X_i - X_{mcj})^2} - \frac{(\dot{R}_i \cos \beta_i \cos \varepsilon_i - \dot{\beta}_i X_i - \dot{\varepsilon}_i H_i \cos \beta_i)(X_i - X_{mcj})}{(Y_i - Y_{mcj})^2 + (X_i - X_{mcj})^2}, \quad (3)$$

$$\dot{R}_j = \frac{(X_i - X_{mcj})(\dot{R}_i \sin \beta_i \cos \varepsilon_i + \dot{\beta}_i Y_i - H_i \dot{\varepsilon}_i \sin \beta_i)}{\sqrt{(Y_i - Y_{mcj})^2 + (X_i - X_{mcj})^2 + H_i^2}} + \frac{(Y_i - Y_{mcj})(\dot{R}_i \cos \beta_i \cos \varepsilon_i - \dot{\beta}_i X_i - H_i \dot{\varepsilon}_i \cos \beta_i) + H_i(\dot{R}_i \sin \varepsilon_i + R_i \dot{\varepsilon}_i \cos \varepsilon_i)}{\sqrt{(Y_i - Y_{mcj})^2 + (X_i - X_{mcj})^2 + H_i^2}}, \quad (4)$$

$\dot{\beta}_i$ – угловая скорость вращения антенны основной РЛС; $\dot{\varepsilon}_i$ – угловая скорость перемещения луча ДНА основной РЛС в плоскости угла места; \dot{R}_i – скорость изменения дальности (перемещения высокопотенциального барьера) основной РЛС до границ зоны ответственности.

При формировании зоны повышенного энергопотенциала относительно основной РЛС кругового обзора, положим $\dot{R}_i = 0$, тогда формулы (3)–(4) примут вид:

$$\dot{\beta}_j = \frac{\dot{\beta}_i((Y_i - Y_{mcj})Y_i + (X_i - X_{mcj})X_i)}{(Y_i - Y_{mcj})^2 + (X_i - X_{mcj})^2}, \quad \dot{R}_j = \frac{\dot{\beta}_j((Y_i - Y_{mcj})Y_i + (X_i - X_{mcj})X_i)}{\sqrt{(Y_i - Y_{mcj})^2 + (X_i - X_{mcj})^2 + H_i^2}} \quad (5)$$

Таким образом, в данной системе задача синхронизации пространственного положения ДНА антенн может быть решена путем использования зависимостей (5) и (6) причем можно показать, что диапазон секторов сканирования дополнительными РЛС $\Delta\beta_s$ лежит в пределах их технических реализаций и может быть реализован аналогично рассмотренному в [3].

Вероятности правильного обнаружения D и ложной тревоги F , в пределах области высокопотенциального барьера по данным активных каналов излучения и приема определяются формулами [1]:

$$D \approx \left(1 + \frac{1}{Nq_{вых}^2}\right)^{N-1} \exp\left(-\frac{0.5U_o}{1 + Nq_{вых}^2}\right), \quad F = \exp\left(-\frac{U_n}{2Q_i^2}\right) \sum_{K=0}^{N-1} \frac{(0.5U_o)^K}{K!}, \quad (6)$$

где N – число приемных позиций; $q_{вых}^2$ – отношение сигнал/шум; $U_o = U_n/Q^2$ – нормированный пороговый уровень; K – число передающих позиций; Q – весовые коэффициенты с выходов квадратичных детекторов всех позиций; U_n – порог обнаружения.

Реализация процедур (7) возможна при синхронизации всех позиций системы во времени. Различают следующие способы синхронизации позиций МПРЛС:

- ♦ с *временной* синхронизацией, когда начала отсчета времени (моменты излучения зондирующих импульсов) t_{i_0}, t_{j_0} i -й приемной и j -й передающей

позиции функционально связаны, т.е. $t_{j_0} = f_i(t_{i_0})$ $i, j = \overline{1, N}$, N – количество позиций (станций) в системе).

В частности, при $t_{j_0} = t_{i_0}$ синхронизация называется абсолютной, а при $t_{j_0} = t_{i_0} + \Delta t_{ij}$ – последовательной, где $\Delta t_{ij} = L_{ij}/c$, L_{ij} – расстояние (база) между i -й и j -й станциями, c – скорость света;

- ♦ *фазовой* синхронизацией, когда начальные фазы зондирующих сигналов взаимосвязаны, т.е. $\Delta \varphi_{i_0} = f_\varphi(\varphi_{j_0})$. Фазовая синхронизация также может быть абсолютной ($\varphi_{i_0} = \varphi_{j_0}$) или последовательной ($\varphi_{i_0} = \varphi_{j_0} + 2\pi f_j R_{ij}/c$, где f_j – несущая частота зондирующего сигнала j -й станции);
- ♦ *частотной* синхронизацией, когда несущие частоты приемопередающих станций находятся в функциональной связи: $f_i = f_j[f_j(t)]$. При $f_i = f_j$ (все станции работают на одинаковых частотах) частотную синхронизацию можно назвать абсолютной;
- ♦ *пространственной* синхронизацией, когда производится согласование пространственного положения (углов наведения γ) лучей антенных систем РЛС по определенному закону, т.е. $\gamma_i = f_\gamma(\gamma_j)$;
- ♦ *комбинированной* синхронизацией, когда одновременно осуществляется два – три вышеназванных способа синхронизации
- ♦ асинхронный режим работы станций, т.е. $t_{j_0} \neq f_t(t_{i_0})$, $\varphi_{j_0} \neq f_\varphi(\varphi_{i_0})$, $f_i \neq f_j(f_j)$, $\gamma_i \neq f_\gamma(\gamma_j)$.

Таким образом по способу синхронизации МПРЛС делятся на системы полностью или частично синхронизированные и системы без синхронизации. По времени излучения (приема) сигналов выделим следующие режимы работы элементов МПРЛС при синхронизации:

- ♦ с одновременным излучением (наиболее просто реализуем с использованием системы единого времени);
- ♦ последовательным излучением (осуществляется путем хронизации РЛС относительно основной);
- ♦ одновременным облучением цели (такой режим потенциально способен реализовать когерентное сложение сигналов на цели, но требует сложной процедуры вычисления времен запусков передающих систем так называемого времени вхождения в синхронный режим);
- ♦ последовательным облучением цели (данный режим позволяет реализовать аналог длительного когерентного накопления на приемных позициях);
- ♦ с одновременным приемом сигналов на позициях (такой режим потенциально способен реализовать процедуры совместного обнаружения цели и режимы координатной обработки);

- ♦ одновременным облучением цели и одновременным приемом на позициях (этот режим потенциально способен реализовать как когерентное сложение сигналов на цели, так и процедуры когерентного накопления на приемных позициях).

При организации совместного приема сигналов с различными способами временной синхронизации (абсолютной, последовательной или без синхронизации) рассмотрим все физически реализуемые временные задержки эхосигналов в МПРЛС (рис. 3).

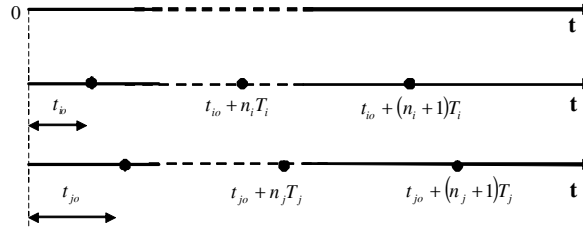


Рис. 3. Временная диаграмма работы позиций при отсутствии синхронизации

Временной интервал между сигналами излученными i -й позицией и принятым относительно отсчета j -й позицией:

$$\Delta t_{ijk} = (t_{i0} + n_i T_i + t_{ik} + t_{sk}) - (t_{j0} + n_j T_j) = t_{ik} + t_{jk} + [(t_{i0} - t_{j0}) + (n_i T_i - n_j T_j)], \quad (7)$$

где t_{i0} , t_{j0} , n_i , n_j , T_i , T_j – начало отсчета (время излучения), количество зондирований и период повторения импульсов i -й и j -й РЛС соответственно.

При излучении сигнала i -й позицией и приеме его на j -й позиции (и наоборот) разность времени приема сигналов определяется выражением

$$\Delta t_{ijk} = (t_{i0} + n_i T_i + t_{ik} + t_{kj}) - (t_{j0} + n_j T_j + t_{jk} + t_{kj}) = [(t_{i0} - t_{j0}) + (n_i T_i - n_j T_j)]. \quad (8)$$

При измерении временных задержек относительно собственного эхосигнала i -й станции и суммой длин путей образованного распространением сигнала от j -й позиции до цели и от цели до i -й позиции

$$\Delta t_{ijk} = (t_{i0} + n_i T_i + 2t_{ik}) - (t_{j0} + n_j T_j + t_{jk} + t_{ik}) = t_{ik} - t_{jk} + [(t_{i0} - t_{j0}) + (n_i T_i - n_j T_j)], \quad (9)$$

Разность сигналов образованная временными интервалами приема собственного излучения на соответствующих позициях:

$$\Delta t_{ijk} = (t_{i0} + n_i T_i + 2t_{ik}) - (t_{j0} + n_j T_j + 2t_{jk}) = 2(t_{ik} - t_{jk}) + [(t_{i0} - t_{j0}) + (n_i T_i - n_j T_j)]. \quad (10)$$

При вычислении разности времени между суммой длин путей образованного распространением сигнала от i -й позиции до цели и от цели до j -й позиции, а от нее вдоль линии базы к i -й позиции

$$\Delta t_{ijk} = (t_{i0} + n_i T_i + t_{ik} + t_{kj} - t_L) - (t_{j0} + n_j T_j + t_{jk} + t_{kj} - t_L) = [(t_{i0} - t_{j0}) + (n_i T_i - n_j T_j)]. \quad (11)$$

При излучении сигнала, например s -й позицией возникает разность хода волн между i -й и j -й РЛС:

$$\Delta t_{ijk} = (t_{s0} + n_s T_s + t_{sk} + t_{ik}) - (t_{s0} + n_s T_s + t_{sk} + t_{jk}) = t_{ik} - t_{jk} \quad (12)$$

Как следует из (7-12) выражение

$$\Delta t_a = [(t_{i0} - t_{j0}) + (n_i T_i - n_j T_j)], \quad (13)$$

и определяет степень асинхронности излучения.

Условие абсолютной синхронизации выполняется (например, введением специальной системой единого времени) при $t_{j0} = t_{i0}$, $n_i = n_j$, $T_i = T_j$, либо $n_i T_i = n_j T_j$, что достигается например управлением количества зондирований и

периодом повторения импульсов $T_i = n_j T_j / n_i$ выражения (7–9) примут вид: $\Delta t_{ijk} = t_{ik} + t_{jk}$, $\Delta t_{ijk} = t_{ik} - t_{jk}$, $\Delta t_{ijk} = 2(t_{ik} - t_{jk})$, а (10) и (11) будут равны нулю. Это означает, что абсолютная синхронизация по времени излучения не обеспечивает одинаковости времени приема излучения.

Таким образом, зависимости (7)–(12) служат основой для синхронизации моментов облучения цели всеми позициями, входящими в систему, и моментов приема отраженного сигнала от цели при реализации соответствующих процедур задержки моментов излучения и моментов приема сигналов на позициях.

Примем, что АПМПРЛС, изображенная на рис. 1 и 2, формирует следующие шесть суммарных измерений, образованных излучением и приемом сигналов с соответствующих позиций:

$$\begin{aligned} t_{ik} + t_{jk} &= t_{Lij} - \Delta t_{ijk} = t_{\Sigma ijk}, & t_{jk} + t_{ik} &= \Delta t_{Lji} - \Delta t_{jik} = t_{\Sigma jik}, \\ t_{ik} + t_{sk} &= \Delta t_{Lis} - \Delta t_{isk} = t_{\Sigma isk}, & t_{sk} + t_{ik} &= \Delta t_{Lsi} - \Delta t_{sik} = t_{\Sigma sik}, \\ t_{jk} + t_{sk} &= \Delta t_{Ljs} - \Delta t_{jks} = t_{\Sigma jsk}, & t_{sk} + t_{jk} &= \Delta t_{Lsj} - \Delta t_{sjk} = t_{\Sigma sjk}. \end{aligned} \quad (14)$$

Три измерения разности расстояний, образованные излучением сигнала с одной из позиций и приеме его на двух других:

$$\begin{aligned} t_{ik} + t_{jk} - (t_{ik} + t_{sk}) &= t_{jk} - t_{sk} = \Delta t_{ijsk}, \\ t_{jk} + t_{ik} - (t_{jk} + t_{sk}) &= t_{ik} - t_{sk} = \Delta t_{jisk}, \\ t_{sk} + t_{jk} - (t_{sk} + t_{ik}) &= t_{jk} - t_{ik} = \Delta t_{sjik}. \end{aligned} \quad (15)$$

Три разности расстояний образованные измерениями, в случае, когда цель является источником радиоизлучения:

$$t_{ik} - t_{jk} = \Delta t_{ijk}, \quad t_{ik} - t_{sk} = \Delta t_{isk}, \quad t_{jk} - t_{sk} = \Delta t_{jks}. \quad (16)$$

Выражения (16) позволяют получить информацию для управления временем излучения для синхронного облучения цели и временем задержки сигнала для реализации процедуры накопления сигналов при обнаружении. На рис. 4 приведен для примера процесс синхронизации применительно к паре позиций. Если разность $\Delta t_{ijk} > 0$, то момент излучения основной i -й РЛС остается неизменным, а на j -й позиции производится задержка на величину Δt_{ijk} , на который задерживается и момент излучения до j -й позиции, если разность $\Delta t_{ijk} < 0$, то процессы задержки моментов излучения и приема происходят в обратной последовательности.

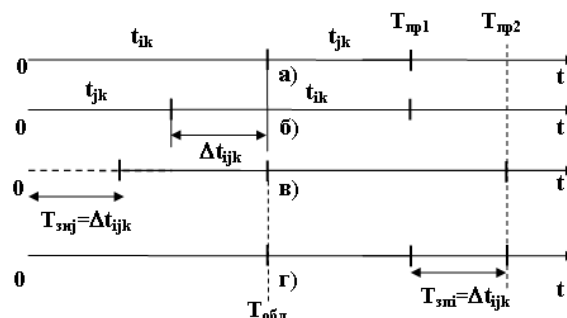


Рис. 4. Пояснение процесса синхронизации моментов облучения и приема сигналов от цели

При синхронизации режимов работы АПМПРЛС отношение сигнал/шум в системе при одинаковом уровне шумов на каждой из позиций определяется формулой $q = \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^K (q_{ij})$, которая, по сути, и определяет увеличение отношения сигнал/шум при кооперативной обработке [1].

Переходя от временных параметров к дальномерным на основании (14)–(16) составим систему линейных алгебраических уравнений, которая обладает избыточным количеством измерений для оценки неизвестных наклонных дальностей:

$$\left\{ \begin{array}{l} 1 \cdot R_i + 1 \cdot R_j + 0 \cdot R_s = R_{\Sigma ij} \\ 1 \cdot R_i + 1 \cdot R_j + 0 \cdot R_s = R_{\Sigma ji} \\ 1 \cdot R_i + 0 \cdot R_j + 1 \cdot R_s = R_{\Sigma is} \\ 1 \cdot R_i + 0 \cdot R_j + 1 \cdot R_s = R_{\Sigma si} \\ 0 \cdot R_i + 1 \cdot R_j + 1 \cdot R_s = R_{\Sigma js} \\ 0 \cdot R_i + 1 \cdot R_j + 1 \cdot R_s = R_{\Sigma sj} \\ 0 \cdot R_i + 1 \cdot R_j - 1 \cdot R_s = R_{\Delta jis} \\ 1 \cdot R_i + 0 \cdot R_j - 1 \cdot R_s = R_{\Delta jis} \\ 1 \cdot R_i - 1 \cdot R_j + 0 \cdot R_s = R_{\Delta sij} \\ 1 \cdot R_i - 1 \cdot R_j + 0 \cdot R_s = R_{\Delta ijs} \\ 1 \cdot R_i + 0 \cdot R_j - 1 \cdot R_s = R_{\Delta is} \\ 0 \cdot R_i + 1 \cdot R_j - 1 \cdot R_s = R_{\Delta js} \end{array} \right. \quad (17)$$

Во избежание корреляций измерений сумм и разностей расстояний по данным активных каналов необходимо принять соответствующие меры частотно-территориального разноса позиций [5, 7].

Задачу повышения точности измерения наклонных дальностей при кооперативной обработке данных относительно каждой из позиций рассмотрим, основываясь на результатах, полученных в работах [8, 9]:

$$\hat{\mathbf{X}} = (\mathbf{A}^T \mathbf{W} \mathbf{A})^{-1} \mathbf{A}^T \mathbf{W} \mathbf{H}, \quad (19)$$

где $\mathbf{W} = \begin{vmatrix} w_1 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & w_2 & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & 0 & w_N \end{vmatrix}$ – матрица весов оценок измерений;

$$\mathbf{A} = \partial Z(\hat{\mathbf{X}}) / \partial \hat{\mathbf{X}} = \begin{vmatrix} \partial z_1 / \partial \hat{R}_1 & \partial z_1 / \partial \hat{R}_2 & \dots & \partial z_1 / \partial \hat{R}_n \\ \partial z_2 / \partial \hat{R}_1 & \partial z_2 / \partial \hat{R}_2 & \dots & \partial z_2 / \partial \hat{R}_n \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ \partial z_N / \partial \hat{R}_1 & \partial z_N / \partial \hat{R}_2 & \dots & \partial z_N / \partial \hat{R}_n \end{vmatrix},$$

матрица состояния системы, которая для случая линейной обработки представляет собой матрицу постоянных коэффициентов:

$$A = \begin{pmatrix} a_{11} & a_{12} & \dots & a_{1N} \\ a_{21} & a_{22} & \dots & a_{2N} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ a_{N1} & a_{N2} & a_{N3} & a_{NN} \end{pmatrix}; \quad (20)$$

$$\Lambda = \text{diag}[\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_N]; \quad (21)$$

– диагональная матрица, размером $N \times N$ учитывающая наличие или отсутствие измерений, если i -е измерение используется в матрице \mathbf{U} , то $\lambda_i = 1$, если не используется, то $\lambda_i = 0$;

$$\mathbf{H}^T = \left\| \hat{R}_{\Sigma_{ij}}, \dots, \hat{R}_{ii}, \dots, \hat{R}_{ij}, \dots, \hat{R}_{ijN} \right\|. \quad (22)$$

С учетом 17–22 получим выражения для оценки наклонных дальностей:

$$\begin{aligned} \tilde{R}_i &= \frac{1}{8} \left(\hat{R}_{\Sigma_{ij}} + \hat{R}_{\Sigma_{ji}} + \hat{R}_{\Sigma_{is}} + \hat{R}_{\Sigma_{si}} + \hat{R}_{\Delta_{ijs}} + \hat{R}_{\Delta_{sij}} + \hat{R}_{\Delta_{ij}} + \hat{R}_{\Delta_{is}} \right), \\ \tilde{R}_j &= \frac{1}{8} \left(\hat{R}_{\Sigma_{ij}} + \hat{R}_{\Sigma_{ji}} + \hat{R}_{\Sigma_{js}} + \hat{R}_{\Sigma_{sj}} + \hat{R}_{\Delta_{ijs}} - \hat{R}_{\Delta_{sij}} - \hat{R}_{\Delta_{ij}} + \hat{R}_{\Delta_{is}} \right), \\ \tilde{R}_s &= \frac{1}{8} \left(\hat{R}_{\Sigma_{is}} + \hat{R}_{\Sigma_{si}} + \hat{R}_{\Sigma_{js}} + \hat{R}_{\Sigma_{sj}} - \hat{R}_{\Delta_{ijs}} - \hat{R}_{\Delta_{jis}} - \hat{R}_{\Delta_{is}} - \hat{R}_{\Delta_{js}} \right). \end{aligned} \quad (23)$$

Дисперсия наклонных дальностей при учете равноточности измерений сумм и разностей расстояний определяется как:

$$\sigma_{R_i}^2 = \sigma_{R_j}^2 = \sigma_{R_s}^2 = \text{diag}(A^T A)^{-1} \sigma_0^2 = \begin{pmatrix} 1/8 & 0 & 0 \\ 0 & 1/8 & 0 \\ 0 & 0 & 1/8 \end{pmatrix} \sigma_0^2, \quad (24)$$

где σ_0^2 – дисперсия измерения с единичным весом.

Таким образом, применение кооперативной обработки в активно-пассивной многопозиционной системе позволяет:

- ◆ Реализовать процедуры совместного обнаружения и измерения координат целей.
- ◆ Повысить вероятность правильного обнаружения цели.
- ◆ Повысить точность измерений дальностей относительно соответствующих станций почти в 3 раза в рамках рассматриваемого примера, что приводит к эквивалентному увеличению точности определения прямоугольных координат.

Процедуры кооперативной обработки не накладывают ограничений на применение процедур фильтрации измерений (например, фильтра Калмана–Бьюсси или α , β -фильтра).

Способ адаптивен к пропускам части измерений, при этом, как и во всех процедурах оценивания, ухудшается точность измерений.

Другим принципиальным достоинством данного способа является то, что высокоточные оценки координат получены за один цикл обработки информации в системе, что дает существенный временной выигрыш.

Наличие пассивных каналов измерений и управление режимами излучений соответствующих позиций позволяет повысить скрытность работы системы.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Черняк В.С.* Многопозиционная радиолокация. – М.: Радио и связь, 1993. – 416 с.
2. *Кондратьев В.С., Котов А.Ф., Марков Л.Н.* Многопозиционные радиотехнические системы. – М.: Радио и связь, 1986. – 264 с.
3. *Аверьянов В.Я.* Разнесенные радиолокационные станции и системы. – Минск.: Техника, 1978. – 148 с.
4. Справочник по радиолокации: Пер. с английского / Под общ. ред. К.Н. Трофимова. – М.: Сов. радио, 1978. – Т. 4. – 376 с.
5. *Ширман Я.Д.* Теоретические основы радиолокации: Учебное пособие для вузов. – М.: Сов. радио, 1970. – 560 с.
6. *Кузьмин С.З.* Основы теории цифровой обработки радиолокационной информации. – М.: Сов. радио, 1974. – 432 с.
7. *Охрименко А.Е.* Основы обработки и передачи информации. – Минск: МВИЗРУ ПВО, 1990. – 179 с.
8. *Машков Г.М., Борисов Е.Г.* Получение максимально правдоподобных оценок координат целей при кооперативной обработке дальномерно-угломерной информации // Известия вузов России. Радиоэлектроника. – 2012. – Вып. 3. – С. 84-92.
9. *Борисов Е.Г., Степанов М.Г.* Кооперативная обработка координатной информации в двухпозиционной радиолокационной системе // Вопросы радиоэлектроники. Серия «Радиолокационная техника». – 2012. – № 1. – С. 58-65.

Статью рекомендовал к опубликованию д.т.н., профессор В.Х. Пшихопов.

Борисов Евгений Геннадьевич – Санкт-Петербургский государственный университет телекоммуникаций им. проф. М.А. Бонч-Бруевича; e-mail: begspb1967@mail.ru; 191186, Санкт-Петербург, наб. р. Мойки, 61; тел.: 88123235895; 88123158729; к.т.н.; доцент; кафедра радиотехнических систем; профессор.

Машков Георгий Михайлович – e-mail: MashkovGM@sut.ru; тел.: 88123051231; д.т.н.; профессор; первый проректор – проректор по учебной работе.

Турнецкий Леонид Сергеевич – ОАО «Научно-производственное предприятие "Радар ММС"», Санкт-Петербург; e-mail: tls7@rambler.ru; 197375, Санкт-Петербург, ул. Новосельковская, 37; тел.: 88126000427, 88125179842; факс: 88126000449; к.т.н.; доцент; начальник отдела.

Borisov Eugeny Gennadjevich – Bonch-Bruevich Saint-Petersburg State University of Telecommunications; e-mail: begspb1967@mail.ru; 61, Moika Embankment, Saint-Petersburg, 191186; Russia; phones: +78123051231, +79219824603; cand. of eng. sc.; associate professor; the department of radio systems; professor.

Mashkov Georgy Mikhailovich – e-mail: MashkovGM@sut.ru; phone: +78123051231; dr. of eng. sc.; professor; senior vice-rector for academic affairs.

Turnetsky Leonid Sergeevitch – Open Joint Stock Company Scientific Production Association «Radar MMS», St. Petersburg; e-mail: tls7@rambler.ru; 37, Novoselkovskaya street, St. Petersburg, 197375, Russia; phone: +78126000427, +78125179842; fax: +78126000449; cand. of eng. sc.; associate professor; head of department.