

КОРРЕЛЯЦИОННЫЙ МЕТОД ОПРЕДЕЛЕНИЯ УГЛА МЕСТА ВОЗДУШНЫХ ОБЪЕКТОВ НАД НЕРОВНОЙ ЗЕМНОЙ ПОВЕРХНОСТЬЮ

к.т.н. В.Г. Гартованов, к.т.н. М.Р. Арасланов, И.В. Кабаченко,
к.т.н. С.В. Пшеничных
(представил д.т.н., проф. Н.Я. Кузь)

Предлагается новый корреляционный метод оценки угла наклона фронта принимаемой электромагнитной волны (угла места цели). В методе использован принцип сравнения корреляционных функций флюктуаций принятых колебаний с эталонами. Эталоны формируются для плотной совокупности угломестных направлений путем моделирования при изменении амплитудно-фазового распределения в раскрыве антенны радиолокационной станции (РЛС). На примере одной из РЛС разработан алгоритм обработки принятых сигналов в режиме измерения высоты обнаруженных целей.

Современный противовоздушный бой требует от обзорных локаторов обеспечения выдачи радиолокационной информации заданного качества по всем трем координатам. Однако большинство РЛС, стоящих на вооружении радиотехнических войск (РТВ) и добывающих такую информацию, являются пока еще двухкоординатными. Обеспечение измерения высоты целей в реальном масштабе времени является актуальной научно-технической задачей при модернизации таких РЛС. Актуальность повышается в связи с использованием обзорных РЛС РТВ в составе мобильных подразделений.

Техническая реализация режима измерения угла места (высоты) воздушных объектов в обзорных РЛС (особенно метрового диапазона волн) связана с серьезными трудностями, в частности, обусловленными переотражениями от земной поверхности. Наиболее сильно указанный эффект Земли проявляется над пересеченной, либо гористой местностью при углах визирования целей ниже $3...5^\circ$ в связи с тем, что фронты излученной и падающей электромагнитных волн приобретают дополнительную существенную амплитудную и фазовую модуляцию за счет интерференции прямой и переотраженных от элементов рельефа местности волн, что снижает точность угломестных измерений.

Так как количество целей, визируемых под углами места ниже 5° , составляет до 80 % от числа обнаруженных и сопровождаемых РЛС, то можно говорить о проблеме обеспечения приемлемой точности определения высоты целей, представляющих наибольший интерес для РТВ.

Есть два основных пути решения данной проблемы:

- уменьшение ширины главного луча диаграммы направленности антенны (ДНА) РЛС в вертикальной плоскости;
- учет параметров, либо компенсация переотражений в составе принятого эхо-сигнала при его обработке в трактах РЛС.

В первом случае требуется увеличение вертикального размера раскрыва антенны РЛС, что ухудшит параметры РЛС, например, в части весогабаритных характеристик и мобильности локаторов. Такой путь является неприемлемым для вооружения радиотехнических войск, особенно для передвижных локаторов метрового диапазона волн.

Реализация второго пути связана с синтезом алгоритмов измерения высоты целей, инвариантных к мешающему воздействию земной поверхности. Для достижения инвариантности, прежде всего, необходимо знать ожидаемые параметры этого воздействия в каждом конкретном случае измерения.

Основным способом получения такой информации является моделирование отражений от земной поверхности. Создание адекватной модели земных отражений является самостоятельной и достаточно научной задачей [1].

Получив априорную информацию о параметрах мешающих переотражений, в принципе можно синтезировать пространственные фильтры, компенсирующие или учитывающие искажения эхо-сигнала переотражениями от любого конкретного участка местности. Но практическая реализация таких методов измерения высоты является крайне сложной и дорогостоящей задачей, поскольку необходим синтез и реализация большого количества пространственных фильтров (диаграммо-образующих схем).

Более простым путем решения данной задачи, позволяющим реально организовать измерение высоты целей станциями с многоканальным (два и более) по углу места приемом, является использование корреляционной обработки сигналов. Имея банк эталонных откликов с выхода приемника на ожидаемые электромагнитные волны (ЭМВ), сформированный, например, путем моделирования с учетом конкретной позиции РЛС для плотной совокупности угломестных направлений, можно сравнить полученную реализацию с выхода приемника с ожидаемыми и по выбранному критерию определить искомый угол наклона фронта принимаемых колебаний.

Предлагается один из возможных методов реализации такой пространственной корреляционной обработки сигналов, названный амплитудно-фазовым корреляционным методом определения угла места воздушных объектов. В основу предложенного метода положен принцип нахождения и последовательного сравнения автокорреляционных либо взаимокорреляционных функций параметров флюктуаций принятых антенной РЛС реализаций электромагнитных волн и их эталонных реализаций, полученных методом моделирования для плотной совокупности угломестных направлений в заданном диапазоне углов места. Корреляционные функции находятся для реализаций, получаемых при изменении

амплитудно-фазового распределения (АФР) в вертикальном раскрытии антенны РЛС. Шаг формирования эталонов по углу места задается из условия обеспечения достижимой точности измерений.

Возможность реализации предложенного метода обусловлена интенсивным развитием средств вычислительной техники, систем преобразования и цифровой обработки сигналов, а также разработкой методов автоматического съема информации о свойствах подстилающей поверхности с использованием цифровых карт местности [2].

Предлагаемый метод применим для любого типа радиолокатора, имеющего не менее двух каналов приема с разнесенными по вертикали фазовыми центрами элементов антенн, чтобы обеспечить путем изменения АФР сканирование ДНА.

Новизной метода является:

- использование стандартных цифровых карт местности (ЦКМ) и плана позиции РЛС для получения информации о рельефе и его электрических свойствах, которые необходимы при моделировании;
- одновременное использование амплитудной и фазовой информации о параметрах фронта ЭМВ;
- использование авто либо взаимокорреляционных функций откликов пространственного фильтра при изменении амплитудно-фазового распределения на раскрытии антенной системы для учета параметров искажений фронтов излученной и принимаемой электромагнитных волн.

Рассмотрим суть предложенного метода.

Замечено, что искажения фронтов излученной и принимаемой ЭМВ неодинаковы при изменении угла места, т.е. при изменении наклона фронта волны. Другими словами, параметры закона флюктуаций колебаний во фронте волны изменяются с изменением угла места.

Одним из важнейших условий корректности предложенного метода является знание истинной результирующей ДНА в вертикальной плоскости на соответствующем заданном азимутальном направлении, поскольку ее параметры в значительной мере зависят от рельефа и электрических свойств подстилающей поверхности.

Результирующие направленные свойства антенны обзорной РЛС в вертикальной плоскости предложено определять фацетно-рассеивающим методом [1], позволяющим учитывать полурастесанный характер отражений от местности.

Рассмотрим простейший случай измерительной системы, когда в вертикальной плоскости есть два элемента решетки. Применительно к РЛС с такой антенной принцип измерения высоты воздушных объектов иллюстрируется рис. 1.

Вначале для формирования банка эталонных реализаций ожидаемых сигналов на заданном азимутальном направлении с помощью фацетно-рассеивающего метода [1] формируется модель угломестной результирующей ДНА рассматриваемой РЛС на излучение. При расчетах учитывается множи-

тель системы. Одновременно моделируются результирующие ДН этажей антенны.

Далее задаются ожидаемые направления прихода пространственной волны ϵ_i . Шаг выбирается из условия обеспечения потенциальной точности измерений угла места.

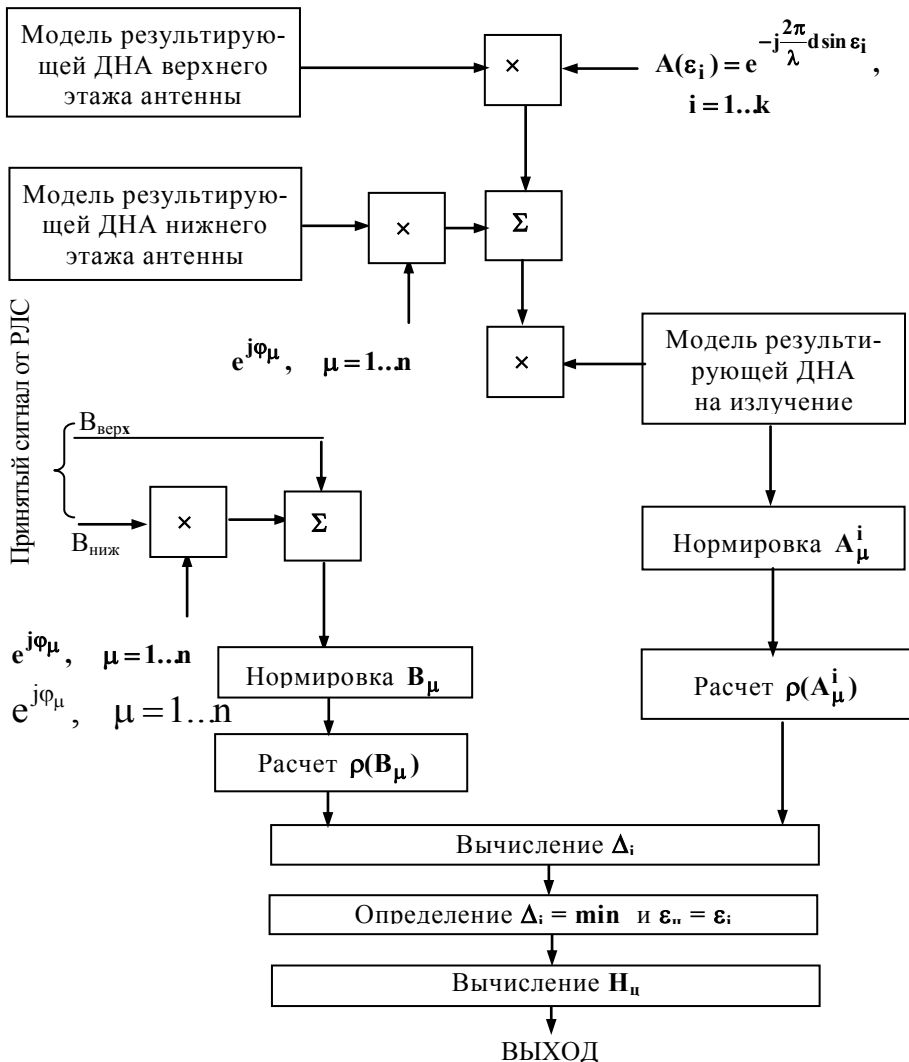


Рис. 1. Принцип измерения высоты воздушных объектов амплитудно - фазовым корреляционным методом

Для каждого заданного направления прихода пространственной ЭМВ

производится расчет массива комплексных значений ожидаемых реализаций при изменении амплитудной и фазовой запитки этажей антенны. Тем самым обеспечивается "скрытое сканирование" результирующей ДНА РЛС в режиме приема в заданных пределах. Таким образом, производится перенос на плоский и синфазный фронт волны с направления ϵ_i ожидаемых флюктуаций амплитуды и фазы, возникающих вследствие интерференции прямой и отраженных от подстилающей поверхности волн. Такая процедура производится с целью определения ожидаемой АКФ искажений фронта принимаемой волны при сканировании результирующей ДНА РЛС.

Эквивалентная схема данной процедуры приведена на рис. 2.

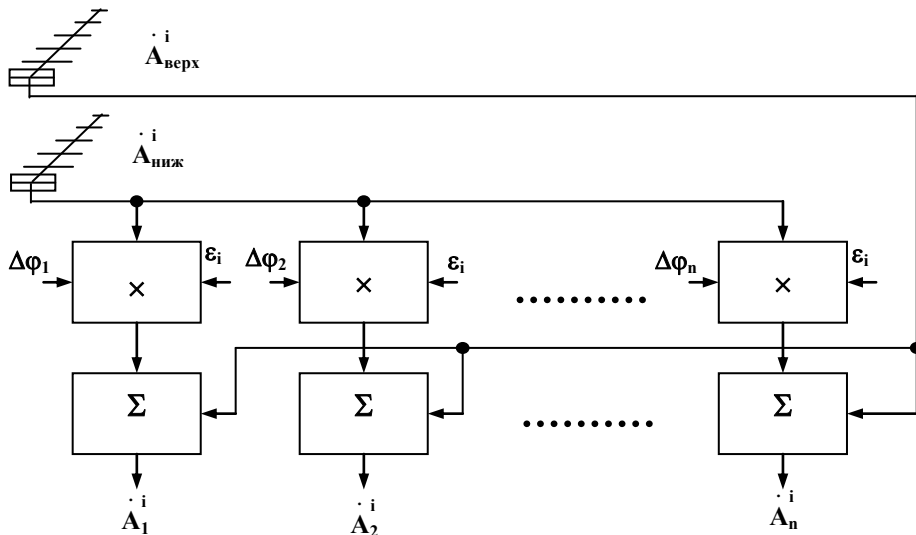


Рис. 2. Эквивалентная схема формирования "скрытого" сканирования антенны при равномерном амплитудном распределении

На каждом выходе сумматора формируются комплексные реализации откликов на эталонные пространственные волны, определяемые выражением

$$\dot{A}_\mu^i(\epsilon_i) = \dot{A}_n(\epsilon_i) * e^{j\varphi_\mu} + \dot{A}_в(\epsilon_i) * e^{-j\frac{2\pi}{\lambda} d \sin \epsilon_i}, \quad (1)$$

где $i = 0, 1, 2, \dots, k$ - номер угломестного направления прихода принимаемой волны; $\mu = 0, 1, 2, \dots, n$ - номер реализации результирующей ДНА;

$\varphi_\mu = -\frac{\pi}{8} + \mu\Delta\varphi$ - межэтажная разность фаз запитки; $\Delta\varphi$ - шаг изменения φ_μ ;

$\dot{A}_\mu^i(\epsilon_i)$ - комплексное значение отклика на пространственную вол-

ну с заданного направления ϵ_i на выходе антенны РЛС при Φ_μ ; $\dot{A}_H(\epsilon_i)$ и $\dot{A}_B(\epsilon_i)$ - комплексные значения откликов на пространственную волну с заданного направления ϵ_i на выходах соответственно нижнего и верхнего этажей антенны РЛС; d - разность высот верхнего и нижнего этажей антенны; λ - длина волны несущей зондирующего сигнала.

При программной проверке такая процедура выполнялась следующим образом: комплексная реализация отклика на пространственную

волну с верхнего этажа умножается на множитель $e^{-j\frac{2\pi}{\lambda}d\sin\epsilon_i}$, определяющий набег фазы ЭМВ с заданного направления на верхнем этаже антенны относительно нижнего, а комплексная реализация с нижнего этажа умножается на множитель $e^{j\Phi_\mu}$, задающий межэтажный сдвиг фаз принимаемых колебаний. После когерентного суммирования откликов с выходов этажей антенны и взвешивания полученной суммы соответствующим значением из результирующей ДНА РЛС в режиме излучения производится нормировка полученной реализации для исключения влияния амплитуды и начальной фазы волны на результат измерения. Полученное комплексное значение реализации запоминается и процедура повторяется для следующего заданного значения Φ_μ .

В результате формируется массив комплексных значений откликов на пространственную волну с заданного угломестного направления, состоящий из n членов (реализаций от n вариантов результирующих ДНА РЛС).

Предел изменения Φ_μ выбирается из условия обеспечения наибольшей крутизны дискриминационной характеристики измерителя.

После получения массива ожидаемых комплексных откликов на пространственную волну с минимального заданного угломестного направления, формируются таким же образом массивы и с других ожидаемых угломестных направлений.

Сформированный банк эталонных реализаций имеет k массивов (по количеству заданных направлений прихода пространственной волны), в каждом из которых находится по n ожидаемых откликов \dot{A}_μ^i .

Процедура "скрытого сканирования" прodelьвается и для отклика на пространственную волну, обусловленную эхо-сигналом, угол места ϵ_n которой требуется оценить. В процессе нормировки отклика на принятую волну устраняется, как и в эталонных реализациях, влияние случайной начальной фазы и амплитуды, возникающих при отражении сигнала от цели. В результате формируется массив реализаций принятого сигнала в процессе "скрытого сканирования" \dot{B}_μ , состоящий также из n членов.

Поскольку процесс радиолокационного измерения является вероятностным, и флуктуации амплитуды и фазы колебаний во фронте волны осуществляются по определенному закону распределения плотности ве-

роятностей, то при проведении измерений целесообразно использовать, например, их автокорреляционные функции, являющиеся параметрами законов флуктуаций данных случайных процессов.

Таким образом, для откликов, обусловленных эхо-сигналом цели, полученных путем "скрытого сканирования" результирующей ДНА РЛС получаем автокорреляционную функцию в виде

$$R(\dot{B}_\mu) = \left\{ \sum_{\mu=1}^n \dot{B}_\mu^2; \sum_{\mu=1}^{n-1} \dot{B}_\mu \dot{B}_{\mu+1}; \dots \sum_{\mu=1}^2 \dot{B}_\mu \dot{B}_{\mu+n-2}; \dot{B}_1 \dot{B}_n \right\}. \quad (2)$$

Нормирование АКФ производится путем деления полученных значений на ее дисперсию

$$\rho(\dot{B}_\mu) = \frac{R(\dot{B}_\mu)}{R(0)}. \quad (3)$$

Аналогично вычисляются автокорреляционные функции для откликов, обусловленных эталонными пространственными волнами с направлений $\mathbf{\epsilon}_i$, (эталонные массивы)

$$R(\dot{A}_\mu^i) = \left\{ \sum_{\mu=1}^n \dot{A}_\mu^i{}^2; \sum_{\mu=1}^{n-1} \dot{A}_\mu^i \dot{A}_{\mu+1}^i; \dots \sum_{\mu=1}^2 \dot{A}_\mu^i \dot{A}_{\mu+n-2}^i; \dot{A}_1^i \dot{A}_n^i \right\}. \quad (4)$$

Полученные автокорреляционные функции эталонных реализаций нормируются соответствующей им дисперсией.

Таких автокорреляционных эталонных функций должно быть рассчитано k (по одной для каждого заданного угла места $\mathbf{\epsilon}_i$).

Для выявления степени схожести принятой реализации с эталонными для каждого $\mathbf{\epsilon}_i$ определяется "невязка", например, между огибающей АКФ реализации сигнала цели и одноименными значениями автокорреляционных функций эталонных реализаций методом наименьших квадратов. С этой целью находится разница $\delta_{\mu i}$ между соответствующими значениями $\rho(\dot{B}_\mu)$ и $\rho(\dot{A}_\mu^i)$. Величина результирующей "невязки" определяется по формуле

$$\Delta_i = \sqrt{\sum_{\mu=1}^n (\delta_{\mu i})^2}. \quad (5)$$

Другими словами, осуществляется сравнение рассчитанных для данной подстилающей поверхности среднеквадратических отклонений флуктуаций амплитуды и фазы принятой антенной электромагнитной волны с направления $\mathbf{\epsilon}_n$ и эталонных откликов, полученных в тех же условиях, для плотной совокупности угломестных направлений ее прихода в заданном диапазоне углов места.

Зависимость сумм среднеквадратических отклонений в одноименных точках автокорреляционных функций откликов на принятую ЭМВ

от угла места представляет собой пеленгационную характеристику. Пример такой характеристики в инверсном виде приведен на рис. 3.

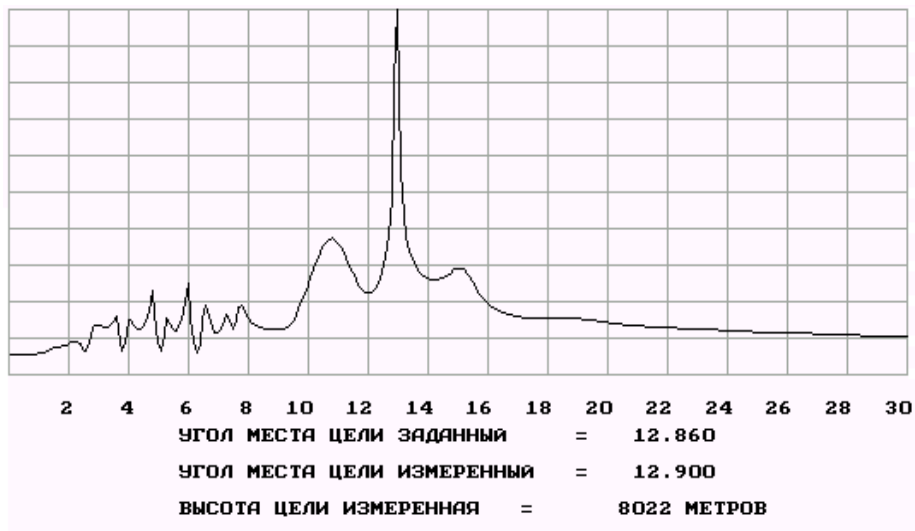


Рис. 3. Пример пеленгационной характеристики при визировании цели под углом места 12.86°

Оценкой угла места прихода эхо-сигнала цели $\epsilon_{ц}$ будет значение ϵ_i , при котором Δ_i будет минимальным (в примере – максимальным).

На основе изложенных принципов предложенного амплитудно-фазового корреляционного метода, сформирована модель измерителя высоты целей применительно к рассматриваемой РЛС. В процессе моделирования выполнялась следующая последовательность процедур:

а) сформирована комплексная модель результирующей ДНА РЛС в режиме излучения с фиксированным фазовым сдвигом $\pi/2$ питающих колебаний между этажами и распределением мощности по этажам антенны: 60 % - нижний этаж, 40 % - верхний;

б) получены комплексные модели результирующих ДН этажей антенны для выбранной позиции РЛС;

в) с определенным шагом (в примере 0.1°) по углу места задается направление прихода эталонной пространственной волны, после чего данная волна взвешивается соответствующей выборкой из результирующей ДНА РЛС в режиме излучения и путем умножения на соответствующие выборки из комплексных результирующих ДН этажей получаются комплексные реализации ожидаемого (эталонного) сигнала на выходах этажей;

г) путем умножения ожидаемых реализаций сигнала на выходе одного этажа на $e^{j\varphi}$, где φ в данном случае изменяется от $-\pi/8$ до π с шагом $\Delta\varphi = \pi/256$, и последующего когерентного суммирования результата с

сигналом на выходе другого этажа получен набор реализаций откликов на заданную пространственную волну при различных межэтажных сдвигах фаз принимаемых колебаний, т.е. при “скрытом сканировании” результирующей угломестной ДНА РЛС в режиме приема. Такая процедура проделана для набора пространственных волн, приходящих, например, с направлений по углу места от 0 до 30° с заданным шагом по ϵ ($\delta\epsilon = 0.1^\circ$) и для пространственной волны с направления прихода эхосигнала $\epsilon_{\text{ц}}$, которое требуется оценить;

д) для реализации сигнала с направления $\epsilon_{\text{ц}}$ найдена путем “скрытого сканирования” автокорреляционная функция. Затем были рассчитаны автокорреляционные функции эталонных реализаций с направлений ϵ_i , где ϵ_i изменяется от 0 до 30° с шагом $\delta\epsilon$;

е) получены “невязки” между автокорреляционной функцией отклика на принятый сигнал и всеми автокорреляционными функциями откликов на эталонные пространственные волны в виде сумм среднеквадратических отклонений соответствующих выборок;

ж) путем “просмотра” всех направлений от 0 до 30° с шагом $\delta\epsilon$ найдено минимальное значение “невязки”. Оценкой $\hat{\epsilon}_{\text{ц}}$ является значение ϵ_i эталонной реализации, при котором обеспечивается названное условие;

з) для полученного $\hat{\epsilon}_{\text{ц}}$ и известной дальности до объекта определяется с использованием эквивалентного радиуса Земли $R_{\text{з}}$, высота объекта над уровнем моря. Далее определяется дальность до точки на Земле, над которой находится объект и по радиальным выборкам рельефа, полученным из ЦКМ, находится высота рельефа, а затем и высота объекта над рельефом.

Структурная схема алгоритма обработки принятых сигналов в режиме измерения высоты для рассматриваемой РЛС приведена на рис. 4.

Исходными данными для проведения измерений являются: комплексные реализации принятого сигнала цели с выходов приемников верхнего и нижнего этажей антенны РЛС $\dot{V}_{\text{в}}$ и $\dot{V}_{\text{н}}$ (в виде оцифрованных значений квадратурных составляющих сигнала на выходах фазовых детекторов), моделей результирующих ДН на прием этажей антенны $\dot{A}_{\text{в}}$, $\dot{A}_{\text{н}}$ и результирующей ДНА на излучение $\dot{A}_{\text{нзл}}$ (в виде массивов комплексных значений результирующих направленных свойств антенн на заданных угломестных направлениях), рассчитанные для текущего азимутального направления, наклонная дальность до цели $d_{\text{ц}}$, максимальный угол места измерений ϵ_{max} , шаг формирования эталонных реализаций пространственной ЭМВ $\Delta\epsilon$, начальная и конечная разность фаз запитки этажей антенны при проведении “скрытого сканирования” ДНА на прием $\varphi_{\text{н}}$ и $\varphi_{\text{к}}$, шаг изменения фазового распределения $\Delta\varphi$.

Для ускорения процесса вычислений в алгоритме предусмотрено

проведение расчетов по двум параллельным ветвям. По первой ветви (блоки 2...8) осуществляется формирование массива откликов на принятый сигнал цели \mathbf{V} при осуществлении “скрытого сканирования” ДНА на прием, нормирование и получение огибающей его автокорреляционной функции $\rho(\dot{\mathbf{V}}_\mu)$.

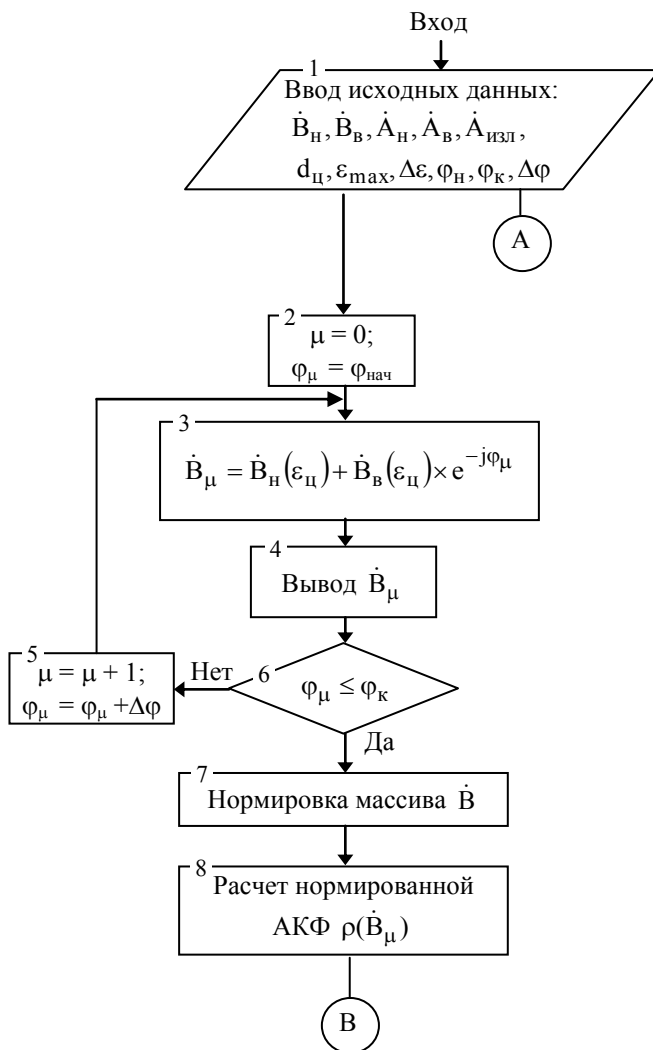


Рис. 4. Структурная схема алгоритма обработки принятых сигналов в режиме измерения высоты для рассматриваемой РЛС

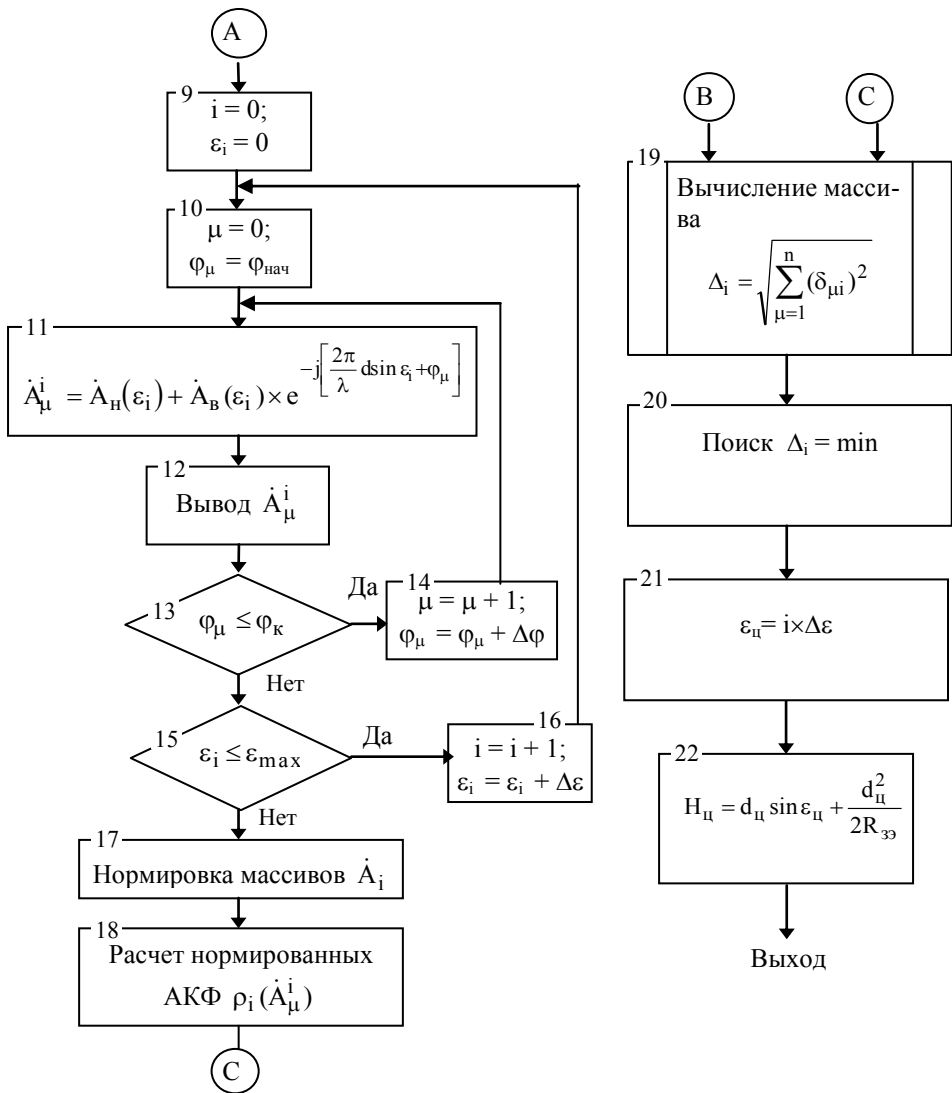


Рис. 4. Структурная схема алгоритма обработки принятых сигналов в режиме измерения высоты для рассматриваемой РЛС (окончание)

Проведена программная проверка изложенного алгоритма. Много-

численные реализации пеленгационной характеристики для рассматриваемой РЛС при различных входных воздействиях и различных уровнях шумов показали возможность однозначной оценки ϵ_{Π} с потенциальной точностью не хуже 0.1° . При отношении сигнал/шум 30дБ обеспечивается среднеквадратическая ошибка оценки ϵ_{Π} не хуже 0.3° .

Таким образом, использование предложенного корреляционного метода измерения угловых координат воздушных объектов позволит реализовать на двухкоординатных обзорных РЛС, имеющих не менее двух каналов приема в вертикальной плоскости, режим измерения высоты целей с высокими точностными характеристиками (не хуже, чем у подвижных радиовысотометров). Однако для практической его реализации требуется проведение экспериментальных работ по калибровке моделей "результатирующей" ДНА РЛС и всей системы измерения угла места в разных условиях местности.

С точки зрения авторов, в силу корректности модели, разработанной методом прямого имитационного моделирования, после ее калибровки следует ожидать хорошего совпадения результатов при экспериментальной проверке.

ЛИТЕРАТУРА

1. Арасланов М.Р., Бабак Э.Н., Гартванов В.Г., Колесник А.Н. *Фацетно-рассеивающий метод определения результирующих направленных свойств антенны обзорной РЛС в вертикальной плоскости при неровностях окружающей земной поверхности* // *Збірник наукових праць*. – Х: ХВУ, 2001. – №7 (37). – С. 51 - 54.
2. Арасланов М.Р., Батыев В.Д., Камалтынов Г.Г., Тимошенко Л.О. *Автоматическое получение информации о рельефе местности из цифровых карт* // *Збірник наукових праць*. – Х.: ХВУ, 1999. – №4 (26). – С. 86 - 94.

Поступила 27.05.2002

АРАСЛАНОВ Михаил Римович, канд. техн. наук, нач. лаборатории – зам. нач. НИО научного центра при ХВУ. В 1985 г. окончил Киевское ВИРТУ ПВО. Область научных интересов – радиолокация, вооружение радиотехнических войск.

ГАРТОВАНОВ Владимир Григорьевич, канд. техн. наук, ст. научный сотрудник, ведущий научный сотрудник НЦ ВПВО. В 1963 г. окончил ВИРТА ПВО. Область научных интересов – радиолокация, вооружение радиотехнических войск.

КАБАЧЕНКО Ирина Васильевна, ст. научный сотрудник НЦ ВПВО. В 1968 г. окончила ХГУ. Область научных интересов – математика, программирование.

ПШЕНИЧНЫХ Сергей Васильевич, канд. техн. наук, начальник НИО научного центра при ХВУ. В 1982 г. окончил ХАИ. Область научных интересов – радиолокация, радиотехническая разведка и РЭБ.