

ЛОКАЦИЯ И НАВИГАЦИЯ

УДК 621.396

ОСОБЕННОСТИ ПОСТРОЕНИЯ РАДИОЛОКАЦИОННОЙ СТАНЦИИ ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЯ ПАРАМЕТРОВ ВЕТРОВОГО ПОТОКА

П.Н. СНИЦАРЕНКО, Р.Р. ТИМОШЕНКО

В работе представлена функциональная схема метеорологической РЛС, в которой путем накопления эхо-сигнала от неоднородностей атмосферы обеспечивается вычисление параметров ветрового потока в любых метеорологических условиях.

Ключевые слова: метеорологическая РЛС, эхо-сигнал, атмосфера, доплеровское приращение.

ВВЕДЕНИЕ

В современных условиях повышаются требования относительно мониторинга метеорологической обстановки, в частности определения сдвига ветра. Сдвиг ветра – это изменение параметров ветрового потока (направления и скорости ветра), ведущее, например, к резкому изменению условий обтекания крыла воздушного судна с потерей подъемной силы. Такое явление может быть опасно при взлете и посадке из-за малого запаса высоты и скорости, что может привести к крушению воздушного судна.

На сегодняшний день проблема мониторинга воздушного потока активно исследуется, а одним из решений стало использование лидаров, с помощью которых проводят мониторинг метеорологической обстановки [1]. Однако в сложных метеорологических условиях, а именно, во время тумана, снега и дождя, лидары не справляются со своими задачами, поэтому возникает необходимость в разработке новых устройств, которые могли бы эффективно работать при таких ограничениях. Известно, что в таких условиях целесообразно использовать радиолокационное зондирование пространства. В то же время для оценки характеристик ветра в атмосфере использование существующего парка радиолокационных станций (РЛС) метеомониторинга или невозможно из-за принципа работы, например, станций ряда МРЛ-(1-6), или низкой оперативности получения необходимой информации в назначенных объемах воздушного пространства, например, РЛС типа «Метеорит». Перспективным направлением для решения этой задачи, которое активно развивается как в теории, так и в практике, последние 20–30 лет, считается применение когерентных метео-РЛС с использованием доплеровской фильтрации принятых сигналов. При этом продолжается поиск как рационального частотного диапазона таких РЛС, так и повышения их когерентности наряду с совершен-

ствованием алгоритмов функционирования. В связи с этим предлагается вариант построения РЛС для измерения параметров ветрового потока, в котором сосредоточено ряд элементов этого поиска.

ОСНОВНАЯ ЧАСТЬ

В основу разработки функциональной схемы перспективной РЛС предлагается положить алгоритм измерения параметров ветра, который, в отличие от существующих алгоритмов измерения направления и скорости движения объектов (хорошо видимых для РЛС на фоне атмосферы), предусматривает проведение измерений по отражению сигнала непосредственно от неоднородностей атмосферы («ясного неба») в конкретных (заданных) точках (элементарных объемах) воздушного пространства. При этом учитывается низкая способность неоднородностей атмосферы по отражению радиосигнала, нестабильность работы генератора сверхвысоких частот (СВЧ), а также потребность в синхронизации работы аналого-цифровых преобразователей, модулятора зондирующих импульсов и других элементов в составе РЛС.

В предлагаемом решении предполагается, что РЛС осуществляет измерение радиальной скорости ветра в заданных путем синхронизации объемах воздушного пространства на интервале дальностей до 15 км. При этом оценка этого параметра основана на когерентном накоплении эхо-сигнала РЛС, отраженного от неоднородностей атмосферы, вызванных ее турбулентностью.

Известно, что в случае однородной изотропной турбулентности воздуха (а это при кратковременной процедуре радиолокационного измерения обычно соблюдается) удельная радиолокационная отражаемость метеообразования определяется соотношением [2]

$$\eta = 0,38C_n^2 \sqrt[3]{\lambda} \quad [\text{м}^{-1}]; \quad (1)$$

где λ – длина волны, на которой ведется зондирование; C_n^2 – параметр, характеризующий интенсивность турбулентности.

Из выражения (1) следует, что величина η – растет с уменьшением длины волны λ . Поэтому предпочтительно иметь значение λ достаточно малое, т. е. целесообразен переход в миллиметровый диапазон волн. Однако в миллиметровом диапазоне существует резонансное поглощение энергии радиоволн атмосферным водяным паром ($\lambda = 13,5\text{мм}$) и кислородом ($\lambda = 5\text{мм}$). Очевидно рациональным значением длины волны РЛС может быть промежуточное между этими величинами. Экспериментально установлено, что таким значением соответствует длина волны равная 7–8 мм. Генерация необходимой мощности зондирующего сигнала рассматриваемой РЛС в этом диапазоне волн не представляет технических трудностей.

Когерентный режим работы РЛС обеспечивается ее функциональной схемой, которая представлена на рис. 1. В этой схеме сигнал с кварцевого генератора (1), подается на смеситель (3), на который также подается опорная частота f_0 с генератора сверхвысоких частот (2). На выходе из смесителя (3) получим сигнал из трех частот, а именно опорной f_0 и двух боковых $f_0 + f_{\text{кварц}}$, $f_0 - f_{\text{кварц}}$, который передается на

фильтр (4). Фильтр (4) обеспечивает выделение одной из боковых частот (например, $f_0 + f_{\text{кварц}}$) путем подавления опорной f_0 и одной из двух боковых частот (например, $f_0 - f_{\text{кварц}}$).

В дальнейшем сигнал через фильтр (4) поступает на модулятор (5), который обеспечивает формирование радиоимпульса. Через усилитель мощности (6) и антенный переключатель (7) радиоимпульс поступает на приемно-передающую антенну (8) для излучения.

Принятый эхо-сигнал через антенный переключатель (7) попадает на усилитель сверхвысоких частот (9), а из него на смеситель (10), куда поступает сигнал с генератора сверхвысоких частот (2), благодаря чему на его выходе образуется сигнал с разностной частотой

$$f_p = f_{\text{кварц}} \pm f_d \pm \Delta f_0, \quad (2)$$

где f_d – доплеровское приращение частоты зондирующего сигнала; Δf_0 – уход частоты генератора СВЧ (2) за счет нестабильности на момент прихода эхо-сигнала РЛС.

Сигнал с частотой f_p усиливается в усилителе промежуточной частоты (11).

Для обеспечения достаточной точности измерения частоты f_d необходимо, прежде всего, исключить приращение частоты Δf_0 . Эту операцию осуществляет адаптивный фильтр-корректор (13) совместно с блоком измерения

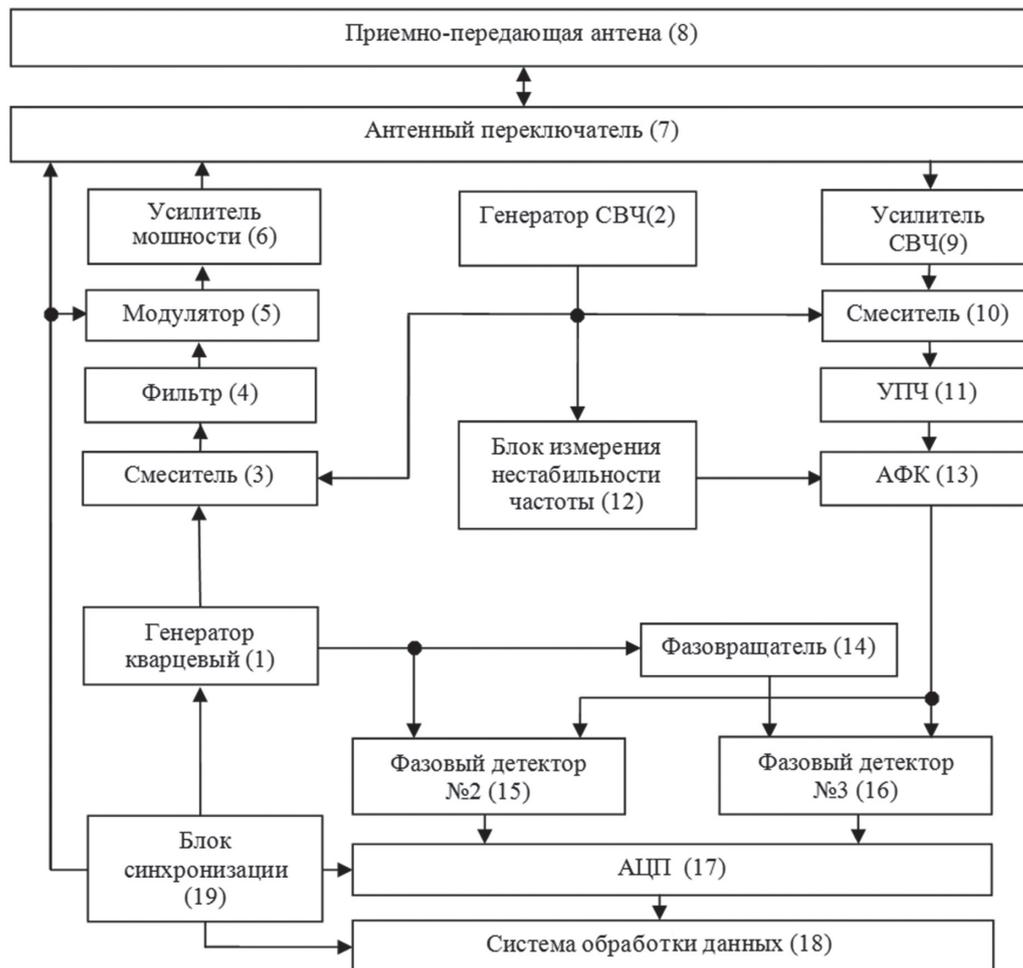


Рис. 1. Функциональная схема радиолокационной станции мониторинга ветрового потока

нестабильности частоты (12), действующих на принципе, который предложен в [3] (эти элементы технически реализуются с использованием сигнального процессора), в результате чего на выходе адаптивного фильтра-корректора (13) действует сигнал с частотой $f_{\text{кварц}} \pm f_{\text{д}}$.

При этом интервал корреляции флюктуаций частоты кварцевого генератора (1) при его частоте порядка 100 МГц и нестабильности 10^{-6} составляет единицы миллисекунд и уход его частоты за время работы РЛС в интервале дальностей до 15 км ($\Delta T \leq 0,1$ мс) фактически не влияет на точность определения частоты $f_{\text{д}}$.

В дальнейшем сигнал поступает на два фазовых детектора (15, 16). При этом сигнал с кварцевого генератора (1) напрямую поступает на один из детекторов (15), а на другой детектор (16) – через фазовращатель (14), который изменяет фазу на $\pi/2$. Сигналы с выходов фазовых детекторов (15, 16) поступают на аналого-цифровой преобразователь (17), где выделяются две квадратурные составляющие в цифровом виде для накопления и обработки в системе (18). Своевременность запуска аналого-цифрового преобразователя (17) и системы (18) обеспечивает блок синхронизации (19).

Таким образом, РЛС отличается «жесткой» когерентностью, обеспечивающей исключение ошибок вследствие нестабильности частоты генератора СВЧ (2). Также предложенная схема обеспечивает возможность задания конкретной дальности зондирования путем соответствующей синхронизации, что обеспечивает проведение измерений параметров ветра на заданных, обычно стандартных, высотах или в заданных объемах пространства. При этом высота измерения зависит от угла зондирования (наклона антенны по отношению к горизонту) и дальности зондирования. В свою очередь, угол зондирования может задаваться заблаговременно (например, устанавливается механически), а дальность – посредством задания определенного времени открытия и закрытия приемного тракта РЛС.

В предложенной схеме РЛС определение доплеровского приращения частоты сигнала в системе обработки данных (18) может быть осуществлено на основе фильтрации с использованием дискретного преобразования Фурье. Наряду с этим также возможно использовать более простой метод, хорошо зарекомендовавший себя в ходе экспериментальной проверки, сущность которого представлена ниже.

Поскольку напряжение принятого эхо-сигнала на выходе фазового детектора модулируется частотой Доплера, то в произвольный отсчет времени оно может быть представлено так:

$$u_{ij} = a \cos(x_{ij} + \varphi_o) + n_{ij}, \quad (3)$$

где a – амплитуда сигнала; $x_{ij} = 2\pi f_{\text{д}} \Delta t(i + (j-1))$ – обобщенная неизвестная; $i = 0, 1, 2$ – номера отсчетов принятого сигнала на выходе фазового

детектора (рациональное число отсчетов равно трем); $j = 1, 2, \dots, S$; S – число измерений для накопления сигнала из отдельного объема пространства; Δt – интервал времени, через который проводится отсчет; φ_o – начальная фаза, равная разности фаз принятого сигнала и опорного сигнала кварцевого генератора; n_{ij} – значение шума в i -й отсчет.

При фиксированном значении $j = \text{const}$ соотношение (3) может быть представлено в виде

$$u_{ij} = a \cos(x_i + \varphi_{\text{нач}}) + n_{ij}, \quad (4)$$

где $\varphi_{\text{нач}} = \varphi_o$; $x_i = (2\pi f_{\text{д}} \Delta t) \times i$; $i = 0, 1, 2$.

Запишем напряжение (4) для полезного сигнала на выходе фазового детектора при $j = \text{const}$ и трех временных отсчетов в виде уравнений, объединим в систему относительно оценок параметров

$$\begin{cases} u_0 = \bar{a} \cos \varphi_{\text{нач}} = \bar{a}^c; \\ u_1 = \bar{a} \cos(\bar{x} + \varphi_{\text{нач}}) = \bar{a}^c \cos \bar{x} - \bar{a}^s \sin \bar{x}; \\ u_2 = \bar{a} \cos(2\bar{x} + \varphi_{\text{нач}}) = \bar{a}^c \cos 2\bar{x} - \bar{a}^s \sin 2\bar{x}, \end{cases} \quad (5)$$

где \bar{a} – оценка амплитуды сигнала a ; $\bar{a}^c = \bar{a} \cos \varphi_{\text{нач}}$, $\bar{a}^s = \bar{a} \sin \varphi_{\text{нач}}$ – оценки квадратурных составляющих амплитуды сигнала; $\bar{x} = 2\pi \bar{f}_{\text{д}} \Delta t$ – оценка обобщенного параметра; $\bar{f}_{\text{д}}$ – оценка доплеровского приращения частоты принимаемого сигнала.

Решение системы уравнений (5) при $j = \text{const}$ относительно оценки \bar{x} можно представить в виде

$$\begin{vmatrix} u_0 & 1 & 0 \\ u_1 & \cos \bar{x} & \sin \bar{x} \\ u_2 & \cos 2\bar{x} & \sin 2\bar{x} \end{vmatrix} = u_0 + u_1 - 2u_2 \cos \bar{x} = 0. \quad (6)$$

При S циклах накопления сигнала величиной шума n_{ij} можно пренебречь. Тогда образуем систему S уравнений вида (6) при $j = 1, 2, \dots, S$ и нормализуем ее, используя метод наименьших квадратов. Для этого запишем функцию невязки в виде

$$F = \sum_{j=1}^S (u_{0j} + u_{1j} - 2u_{2j} \cos \bar{x})^2 = \min. \quad (7)$$

Соотношение (7) можно обеспечить при условии

$$\frac{dF}{dx} = \sum_{j=1}^S u_{1j} (u_{0j} + u_{2j}) - 2 \cos \bar{x} \sum_{j=1}^S u_{1j}^2 = 0. \quad (8)$$

Тогда значение оценки доплеровского приращения частоты принятого сигнала $\bar{f}_{\text{д}}$ на основании решения (8) относительно \bar{x} можно представить формулой

$$\bar{f}_{\text{д}} = \frac{1}{2\pi \Delta t} \arccos \frac{\sum_{j=1}^S u_{1j} (u_{0j} + u_{2j})}{2 \sum_{j=1}^S u_{1j}^2}. \quad (9)$$

Имея оценку $\bar{f}_{\text{д}}$ на основе (9), легко определить радиальную скорость ветра, а осуществив

подобную оценку в смежных объемах воздушного пространства, определяются горизонтальная и вертикальная составляющие скорости, например, в соответствии с алгоритмом, который предложен в [4].

ВЫВОДЫ

1. При использовании предложенной функциональной схемы РЛС и метода вычисления доплеровского приращения частоты эхо-сигнала становится возможным сравнительно просто определить радиальную скорость ветра в заданных зонах (объемах) воздушного пространства и на основе этого других составляющих сдвига ветра на расстояниях до 15 км от станции.

2. Учитывая тот факт, что скорость и направление ветра несущественно изменяются за время проведения серии S измерений, необходимых для накопления сигнала, которые для доли секунды, можно считать оценку доплеровского сдвига частоты сигнала величиной неизменной, что гарантирует высокую точность определения параметров ветрового потока в контролируемой зоне воздушного пространства.

3. Постоянный режим определения радиальной скорости ветра при помощи предложенного типа РЛС обеспечивает своевременное выявление сдвига ветра в любых метеоусловиях, в частности для предупреждения экипажей воздушных судов об этом опасном явлении при взлете или посадке.

Литература

- [1] Зуев В.Е. Дистанционное оптическое зондирование атмосферы / В.Е. Зуев, В.В. Зуев // Современные проблемы атмосферной оптики, том 8. СПб.: Гидрометеоиздат, 1992. — 232 с.
- [2] Дистанционные методы и средства исследования процессов в атмосфере Земли / Под общ ред. Б.Л. Кашеева, Е.Г. Прошкина, М.Ф. Лагутина. Харьков: ХНУРЭ, 2002. — 426 с.
- [3] Литвинов В.В. Повышение защищенности от пассивных помех обзорных РЛС с низкостабильными генераторными приборами / В.В. Литвинов, В.И. Климченко, А.В. Очкуренко // Сборник научных трудов 3-го Международного радиолектронного форума “Прикладная радиоэлектроника. Состояние и перспективы развития” (МРФ’2008). Том I. Часть 1. — С. 109–112.
- [4] Луценко В.И. Изучение турбулентности воздушных масс в грозовых облаках с использованием доплеровских РЛС / В.И. Луценко, И.В. Луценко

// Сборник научных трудов 3-го Международного радиолектронного форума “Прикладная радиоэлектроника. Состояние и перспективы развития” (МРФ’2008). Том I. Часть 1. — С. 67–70.

Поступила в редколлегию 10.11.2014



Сницаренко Петр Николаевич, кандидат технических наук, старший научный сотрудник, ведущий научный сотрудник центра военно-стратегических исследований Национального университета обороны Украины имени Ивана Черняховского. Научные интересы: информационная безопасность в военной сфере, моделирование, оценка эффективности и синтез систем дистанционного мониторинга окружающего пространства.



Тимошенко Роман Родионович, старший научный сотрудник института информационных технологий Национального университета обороны Украины имени Ивана Черняховского. Научные интересы: метеорологическая радиолокация.

УДК 621.396

Особливості побудови радіолокаційної станції для вимірювання параметрів вітрового потоку / П.М. Сницьаренко, Р.Р.Тимошенко // Прикладна радіоелектроніка: наук.-техн. журнал. — 2014. — Том 13. — № 4. — С. 432–435.

В роботі наведено функціональну схему метеорологічної РЛС, в якій шляхом накопичення луна-сигналу від неоднорідностей атмосфери забезпечується обчислення параметрів вітрового потоку в будь-яких метеорологічних умовах.

Ключові слова: метеорологічна РЛС, луна-сигнал, атмосфера, доплерівський зсув.

Лл. 01. Бібліогр.: 4 найм.

UDS 621.396

Specifics of radar design to measure wind flow / P.N. Snytsarenko, R.R.Timoshenko // Applied Radio Electronics: Sci. Journ. — 2014. — Vol. 13. — № 4. — P. 432–435.

The paper presents a functional diagram of a meteorological radar, which by the accumulation of an echo signal from atmospheric inhomogeneities provides measures to calculate parameters of wind flow under any weather conditions.

Keywords: meteorology radar, echo signal, atmosphere, Doppler increment.

Fig. 01. Ref.: 4 items.