

Новые методы обработки сигналов в импульсно–доплеровских системах зондирования атмосферы

В.В. Стерлядкин

Московский государственный университет приборостроения и информатики, Москва, ул. Стромынка, д. 20, E-mail: sterlyadkin@mail.ru

Рассмотрены новые корреляционные методы зондирования, позволяющие повысить возможности импульсных доплеровских систем. Первый метод относится к однозначному измерению скорости и дальности для импульсных когерентных РЛС, использующих доплеровскую обработку пачки импульсов. Метод позволяет снять неоднозначность измерения скоростей в метеорологических РЛС на больших дальностях. Второй метод позволяет повысить разрешение по скорости и дальности для доплеровских систем с внутриимпульсной когерентной обработкой. Это важно для доплеровских лидаров.

Some new correlation methods for remote sensing which can improve the capabilities of pulsed Doppler systems are considered. The first method refers to the unambiguous measurement of speed and distance for coherent pulse radar using Doppler processing of pulse set. The method will allow to disambiguate measuring velocities in weather radars at long ranges. The second method allows you to increase the resolution on the speed and range for Doppler systems with intra-pulse coherent processing. It is important for Doppler lidar

В радиолокации корреляционные принципы измерений и обработки сигналов уже завоевали прочные позиции. Примером могут служить шумовая амплитудная модуляция излучаемого сигнала, при которой корреляционная обработка принимаемого сигнала позволяет однозначно определить дальность целей. Более эффективны методы импульсной кодовой модуляции непрерывных сигналов, позволяющей измерять скорость и дальность в некотором диапазоне. На этом принципе построена работа существующих ДМРЛ [1,2]. Однако, периодический характер кодирования приводит к сложности и неоднозначности измерения скорости на значительных дальностях. Особенно это относится к распределенным метеорологическим целям.

В настоящем докладе рассмотрены новые корреляционные методы измерений и обработки данных, которые позволяют расширить диапазон однозначно измеряемых скоростей и дальностей для импульсных когерентных РЛС. Эта проблема особенно актуальна в сантиметровом и миллиметровом диапазонах длин волн. Аналогичные трудности в интерпретации данных возникают и при внутриимпульсной когерентной обработке сигналов, которая используется в оптических доплеровских системах. В таких системах возникает противоречие между разрешением по скорости и разрешением по дальности. Предложенные методы решают эту проблему. Рассматриваемые методы защищены патентами РФ [3,4].

Способ снятия неоднозначности измерения дальности и скорости для импульсно-доплеровских систем

Традиционные импульсно когерентные (доплеровские) системы (ИКС), использующие фиксированную частоту повторения импульсов $F_{\text{повт}}$, имеют ограничения на однозначно измеряемую дальность R_{max} и однозначно измеряемую скорость V_{max} . Измерения однозначны, если дальность рассеивателей не превышает

$R_{\max} = C/2 F_{\text{повт}}$, а максимальная проекция скорости рассеивателей не превышает $V_{\max} = \lambda F_{\text{повт}}/4$. Здесь C – скорость света в вакууме, λ – длина волны зондирующего излучения. В результате справедливо соотношение: $R_{\max} V_{\max} \leq C \lambda / 8$.

Наиболее устоявшиеся методы расширения диапазона измеряемых скоростей и дальностей основаны на изменении частоты повторения импульсов и сравнении положений максимумов в неоднозначных спектрах. При этом удается расширить диапазон измеряемых величин примерно в 2-4 раза [5,6]. Эти методы сталкиваются с трудностями интерпретации при множественных целях и широком спектре отраженных сигналов, например, в метеорологии [7].

Ранее нами был предложен корреляционный метод однозначного измерения дальности и скорости, основанный на измерении в импульсном некогерентном режиме профиля интенсивности обратно рассеянного сигнала вдоль всей трассы распространения излучения, и измерения суммарного доплеровского спектра вдоль всей трассы с помощью непрерывной доплеровской системы. С периодичностью смены рассеивателей в луче цикл измерений повторяют, а скорость на каждой дальности определяют по доплеровской частоте, на которой получается максимум функции взаимной корреляции между профилем интенсивности обратно рассеянного сигнала (отражаемостью) и спектральной плотностью доплеровского спектра [8]. Недостаток этого метода заключается в том, что при одинаковых скоростях на различных дальностях требуется длительное время накопления сигнала.

Технический результат предложенного способа заключается в снятии неоднозначности при измерении дальности и скорости за счет того, что измерения проводят при двух частотах повторения импульсов. При низкой частоте повторения, рис.1 а, которая обеспечивает однозначное определение дальности, измеряют доплеровские спектры обратно рассеянного сигнала вдоль всей трассы распространения, в частности, мощность и ширину спектра доплеровского сигнала на всех дальностях по трассе. Затем, при высокой частоте повторения импульсов, рис.1 б, которая обеспечивает однозначность измеряемых скоростей рассеивателей, измеряют суммарные доплеровские спектры обратно рассеянных сигналов, полученных одновременно с нескольких дальностей, а по корреляции между параметрами доплеровских спектров вдоль трассы и суммарными доплеровскими спектрами определяют проекции скоростей рассеивателей на всех дальностях. Для повышения надежности результатов в сложных случаях, например при множественных целях на всех дальностях, измерения повторяют с периодичностью смены рассеивателей в зондируемом объеме или с периодичностью изменения отражаемости рассеивателей в зондируемом объеме, а корреляционные характеристики накапливают.

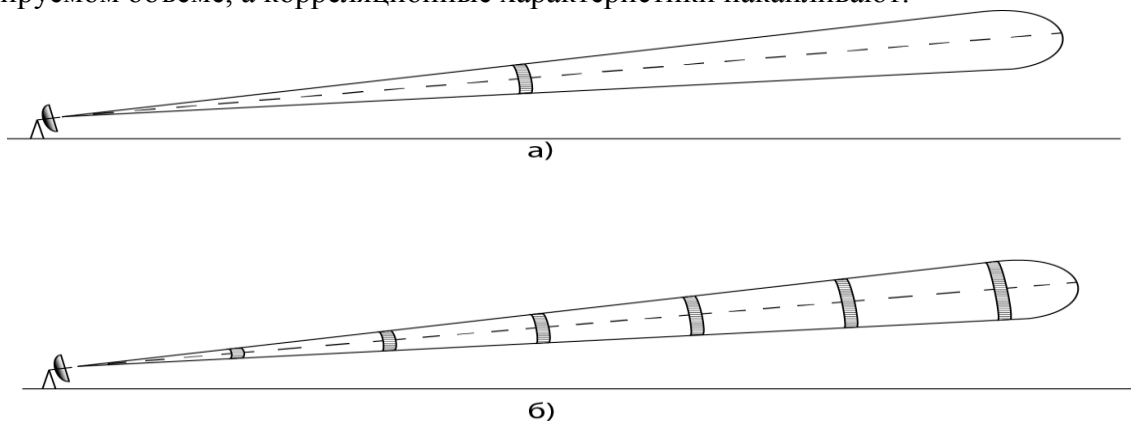


Рис.1. а) Режим однозначного измерения дальности $F_{\text{повт } 1}$, б) режим однозначного определения скорости $F_{\text{повт } 2}$.

На рисунке 1а представлена геометрия зондирования и формирование сигнала при низкой частоте повторения импульсов, при котором однозначно определяется дальность рассеивателей, и определяются доплеровские спектры $S(v, R)$ на всех дальностях R . На рисунке 1 б показан высокочастотный режим повторения импульсов, который обеспечивает однозначность измеряемых проекций скоростей рассеивателей. В этом режиме без искажений определяются суммарные доплеровские спектры обратно рассеянных сигналов, полученных одновременно с нескольких дальностей равноотстоящих друг от друга на расстоянии $\Delta R = R_{i+1} - R_i = C/2 F_{повт2}$.

Рассмотрим способ на примере метеорологического доплеровского радиолокатора, дальность зондирования которого R_{max} составляет 250 км, длина волны $\lambda = 5$ см, а диапазон возможных скоростей метеообразований составляет $V_{max} = \pm 50$ м/с. При заданной дальности зондирования $R_{max} = 250$ км для однозначного определения дальности частота повторения импульсов $F_{повт.1}$ должна составлять $F_{повт.1} = C/2 \cdot R_{max} = 600$ Гц. В этом случае будет обрабатываться сигнал только с одной дальности R , которая определяет временем задержки $\tau = 2R/C$, (см. рис. 1а). При этом режиме зондирования и данной частоте повторения на всех дальностях R определяют доплеровские спектры $S(v, R)$. Однако спектры получаемых сигналов могут быть искажены из-за «сгибания» и наложения участков спектра относительно крайних частот (однозначно измеряемых скоростей) $\pm 7,5$ м/с. Такой режим измерений не обеспечивает регистрацию опасных метеорологических явлений, при которых скорость может достигать ± 50 м/с. Но даже в этом случае можно определить мощность сигнала и оценить ширину спектра на всех дальностях R вдоль траектории распространения излучения.

На рис. 2 представлены примеры доплеровских спектров $S(v, R_1)$, $S(v, R_2)$, $S(v, R_5)$, $S(v, R_6)$, полученных с четырех различных дальностей при низкой частоте повторения. Значения дальностей R_1, R_2, \dots, R_n соответствуют набору равноотстоящих дальностей, для которых будет регистрироваться суммарный доплеровский спектр, полученный при высокой частоте повторения импульсов $F_{повт.2}$. Спектры на дальностях R_3, R_4 не показаны, из предположения малого уровня сигнала, (отсутствия в рассматриваемом примере отражателей, облаков или осадков, на этих дальностях). Спектр $S(v, R_6)$ имеет максимум на краю из-за «сгибания» и наложения участков широкого спектра при низкой частоте повторения импульсов.

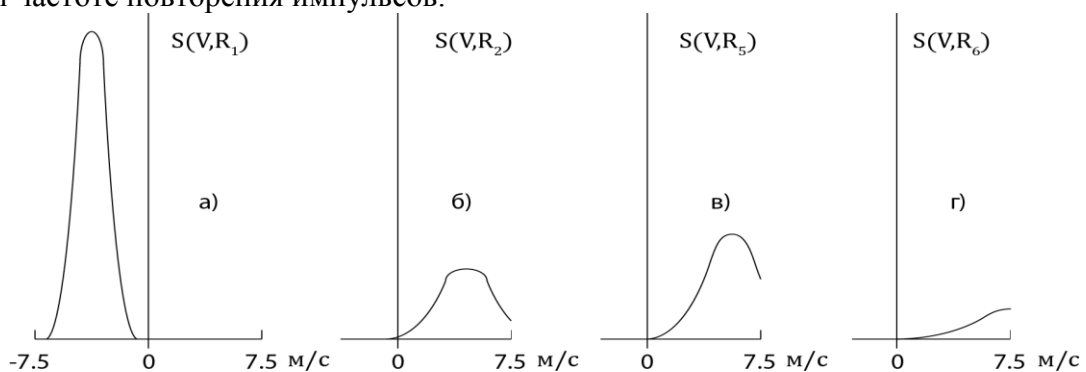


Рис.2. Примеры доплеровских спектров $S(v, R_1)$, $S(v, R_2)$, $S(v, R_5)$, $S(v, R_6)$, полученных с четырех различных дальностей при низкой частоте повторения $F_{повт.1}$. На дальностях R_3 и R_4 сигналы отсутствуют.

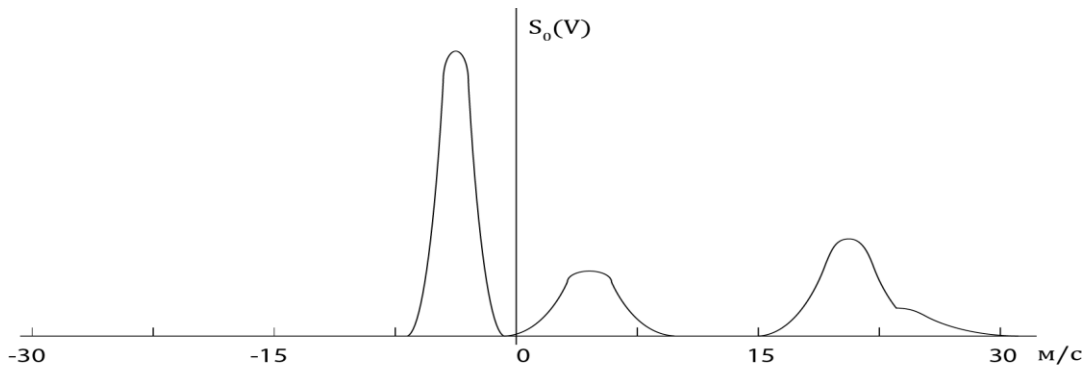


Рис.3. При высокой частоте повторения $F_{\text{повт.2}}$ спектр получают неискаженным, однако он представляет собой сумму спектров со всех дальностей.

Второй режим измерения производится по той же трассе, что и первый, но частоту повторения импульсов выбирают из условия $F_{\text{повт.2}} = 4V_{\text{max}}/\lambda$. Если максимальная скорость в опасных метеоситуациях не превышает ± 50 м/с, то частота повторения $F_{\text{повт.2}} = 4000$ Гц. В этом случае на трассе длиной 250 км одновременно будет существовать несколько областей рассеивания (6 или 7, в зависимости от задержки измерений), отстоящих друг от друга на расстоянии $\Delta R = 37,5$ км, см. рис. 1б. Рассеянный сигнал будет приниматься антенной одновременно со всех этих областей. По задержке между стробом импульса и моментом регистрации сигнала легко рассчитать все дальности R_1, R_2, \dots, R_n , которые формируют результирующий сигнал на приемной антенне. Суммарный доплеровский спектр $S_0(v)$ при частоте повторения $F_{\text{повт.2}}$ вычисляется без искажений и представляет собой сумму истинных неискаженных спектров сигналов со всех 6 или 7 вычисленных дальностей, рис.3. Как правило, этот спектр будет изрезанным, с набором локальных экстремумов. Задача корреляционной обработки заключается в том, чтобы указать истинное расположение спектров с каждой дальности на общем спектре. Это будет означать определение истинных проекций скорости рассеивателей на каждой дальности.

Пример корреляционной обработки по мощности сигналов заключается в том, чтобы на наборе спектров, представленных на рис. 2, выбрать самый мощный сигнал (в примере он соответствует первой дальности $S(v, R_1)$). Затем в суммарном неискаженном спектре $S_0(v)$ найти аналогичный по мощности выброс спектральной плотности. Его положение в спектре $S_0(v)$ центрировано на частоте $v_{01} = -3.5$ м/с, что дает неискаженное значение проекции скорости рассеивателей на дальности R_1 . На следующем шаге из спектра $S_0(v)$ вычитается спектр $S(v, R_1)$, максимум которого сдвинут в положение v_{01} . В результате получаем спектр, который сформирован оставшимися дальностями. Процедура повторяется для следующего по мощности сигнала до тех пор, пока все дальности не будут привязаны по истинной частоте.

Примером корреляционной обработки с учетом интенсивности и ширины спектров $S(v, R_i)$, может служить формирование невязки $H(v_0)$ между $S(v, R_i)$ и общим спектром $S_0(v)$ и нахождение минимума невязки по вектору обобщенных доплеровских частот, (равных проекции скоростей рассеивателей на направление зондирования на всех n дальностях) $\mathbf{v}_0 = \{v_{01}, v_{02}, \dots, v_{0n}\}$:

$$H(\mathbf{v}_0) = \int_v [S_0(v) - \sum_{i=1}^n S(v - v_{0i}, R_i)]^2 dv \quad (1)$$

В результате процедуры минимизации невязки получаем вектор частот \mathbf{v}_0 , который указывает проекции скоростей рассеивателей на всех дальностях. Данная процедура корреляционной обработки в нашем примере дала следующий вектор

проекций скоростей $\mathbf{v}_0 = \{-3.5, 5.0, -, -, 20.0, 24.5\}$, который соответствует всем 6 дальностям. Это процедура уже учитывает не только мощность, но и ширину каждого спектра $S(v, R_i)$.

В случае, если спектры $S(v, R_i)$ центрированы на близких доплеровских частотах и сравнимы по мощности, (близки первые и вторые моменты доплеровских спектров) одного цикла измерений может быть недостаточно для точной привязки всех дальностей по скоростям. В этом случае цикл измерений повторяют с периодичностью смены рассеивателей в луче или с периодичностью изменения отражаемости рассеивателей в зондируемом объеме и проводят корреляционное накопление невязки по всем $j=1, 2, \dots, m$ циклам измерений:

$$H(\mathbf{v}_0) = \sum_{j=1}^m \left\{ \int_{\mathbf{v}} [S_0^{(j)}(\mathbf{v}) - \sum_{i=1}^n S^{(j)}(\mathbf{v} - \mathbf{v}_{0i}, R_i)]^2 d\mathbf{v} \right\} \quad (2)$$

где верхний индекс j у спектров соответствует номеру цикла. В результате нахождения минимума невязки по вектору $\mathbf{v}_0 = \{v_{01}, v_{02}, \dots, v_{0n}\}$ получают истинные проекции скоростей, которые соответствуют заданному набору дальностей R_1, R_2, \dots, R_n .

Корреляционное сравнение спектров $S(v, R_i)$ на наборе дальностей и общего спектра $S_0(v)$ может проводиться не только по мощности и ширине спектров, но и по всем другим характеристикам сравниваемых сигналов: поляризации, деполяризации, спектрам флуктуаций интенсивности, тонкой структуре спектров. Введение дополнительных параметров корреляции повышает устойчивость привязки скорости к каждой дальности и зависит от специфики конкретной задачи радиолокационного обнаружения.

Достоинством предложенного способа является отсутствие принципиальных ограничений на измеряемые значения дальности рассеивателей и их скорости. Кроме того, возможно использование любых длин волн, в том числе более коротких, чем это принято в настоящее время. Это позволяет уменьшить размеры и массу антенных систем и всей аппаратуры в целом, создавать компактные системы с расширенными измерительными возможностями.

Корреляционный способ повышения разрешения по скорости и дальности для импульсных доплеровских систем с внутриимпульсной когерентной обработкой

Перейдем к рассмотрению второго способа обработки сигналов, который относится к дистанционному зондированию пространства методом внутриимпульсной когерентной обработки. В частности к улучшению пространственного разрешения по дальности и разрешения по скорости при использовании импульсных доплеровских систем с внутриимпульсной когерентной обработкой сигналов. Например, для повышения разрешения по скорости и дальности при использовании когерентных доплеровских лидаров в задаче измерения профиля ветра в атмосфере.

Традиционные импульсные доплеровские системы, использующие внутриимпульсную когерентную обработку отраженных сигналов, имеют ограничения на разрешение по дальности ΔR и разрешение по скорости ΔV . При длительности излучаемого импульса τ_n разрешение по дальности составляет $\Delta R = C\tau_n/2$, а разрешение по скорости $\Delta V = \lambda / (2 \cdot \tau_n)$, где C – скорость распространения излучаемой волны, λ – длина волны. В результате получается противоречие: чтобы улучшить пространственное разрешение следует уменьшать длительность излучаемого импульса τ_n , а для повышения разрешения по скорости длительность импульса следует увеличивать. Это приводит к ограничению: $\Delta R \Delta V = C\lambda/4$ [9].

Суть метода заключается в повышении разрешения по дальности и скорости рассеивателей за счет того, что излучают длинные импульсы, регистрируют суммарный

доплеровский спектр отраженного сигнала на длинном участке траектории зондирования с высоким разрешением по скорости, затем по той же траектории излучают короткие импульсы, регистрируют профиль интенсивности отраженного сигнала вдоль длинного участка, а по корреляции между интенсивностью отраженного сигнала вдоль длинного участка и спектральной плотностью доплеровского спектра определяют проекции скоростей рассеивателей вдоль длинного участка.

Для повышения надежности результатов в сложных случаях, например при множественных целях, или малом отношении сигнал/шум, цикл измерений повторяют с периодичностью смены рассеивателей в зондируемом объеме или с периодичностью изменения отражаемости рассеивателей, а корреляционные характеристики накапливают.

На рис. 4 приведен пример обнаружения двух целей, имеющих близкие скорости и близкое расположение в пространстве. Проекция скорости первой цели $V_1=400\text{м/с}$, а второй $V_2=415\text{м/с}$. Доплеровский спектр рассеянного сигнала формируется от длинных импульсов, пространственная протяженность которых составляет $c\tau_{u1}/2=45\text{км}$. Профиль отражаемости по трассе регистрируется короткими импульсами τ_{u2} , которые обеспечивают разрешение по дальности $\Delta R=c\tau_{u2}/2=30\text{м}$.

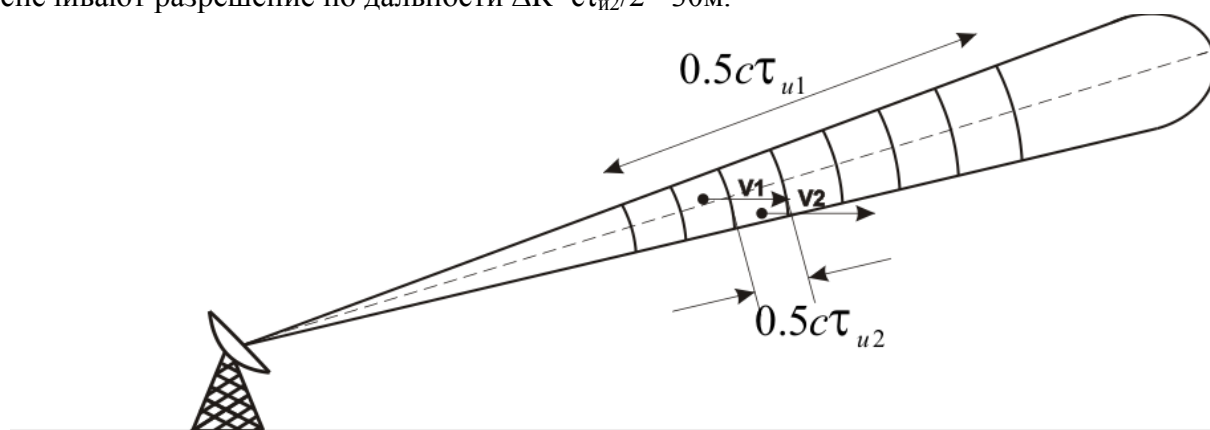


Рис.4. Две одиночные цели имеют близкое пространственное расположение и близкие скорости. Длинный импульс используется для определения скорости целей, а короткие для уточнения дальности.

На рис.5а сплошной линией представлен пример отражаемости σ , измеренной вдоль длинного импульса при первом цикле измерений в момент времени t_1 . Цели зарегистрированы на дальности $R_2=100530\text{м}\pm 15\text{м}$ и дальности $R_3=100560\text{м}\pm 15\text{м}$, которые различаются на 30м. В следующий цикл измерений, через 0,2 секунды, в момент времени t_2 , цели смещаются на дальности R_5 и R_6 и изменяют отражаемость (показано пунктиром). Изменение отражаемости во времени происходит за счет многократной интерференции отраженного когерентного сигнала у сложных целей. Это происходит даже при незначительном изменении ракурса зондирования за счет смещения целей. На рис.5б сплошной линией показан доплеровский спектр обратно рассеянного сигнала, полученного от целей при послыке длинных импульсов в первом цикле измерений, а пунктиром – спектр, полученный при послыке длинных импульсов в следующем цикле через 0,2с. Очевидно, что цель 2, имеющая большую отражаемость, даст на доплеровском спектре большее значение спектральной плотности. Изменение спектра связано с изменением отражаемости целей от цикла к циклу. Переключение режима работы с длинных на короткие импульсы происходит в каждом цикле за время, много меньшее, чем время корреляции интенсивности принимаемых сигналов.

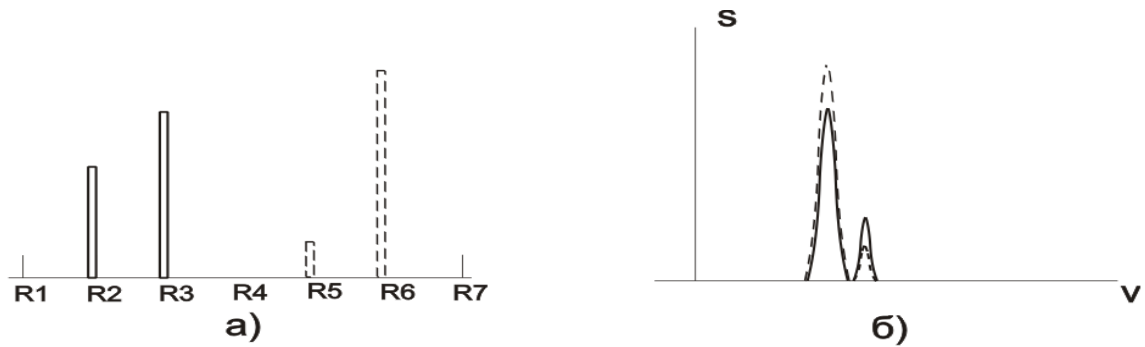


Рис.5. а) сплошная линия - зависимость отражаемости от дальности в момент времени t_1 , пунктир - та же зависимость через 0,2с. б) сплошная линия – спектр, полученный для первого измерения в момент t_1 , пунктир – такой же спектр через 0,2с.

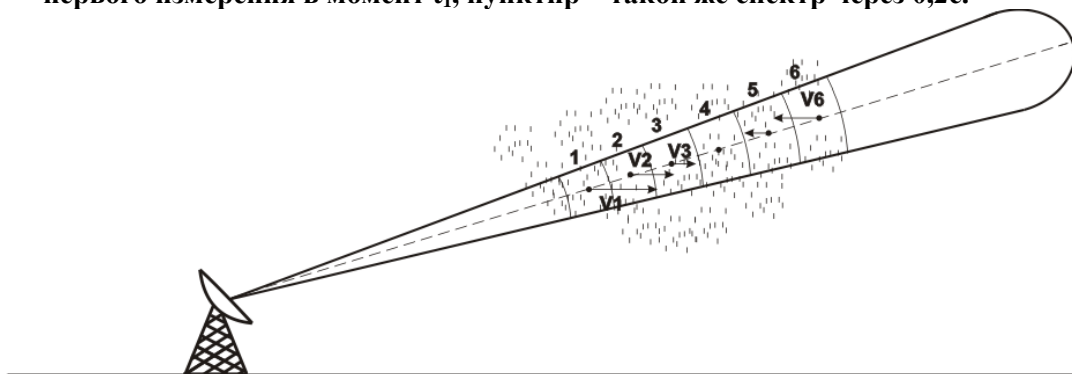


Рис.6. Пример повышения разрешения по дальности и скорости для распределенной метеоцели. Длинный импульс разбивается коротким импульсом на 6 участков, в каждом из которых своя проекция скорости.

На рис. 6 приведен пример повышения разрешения по дальности и скорости рассеивателей при зондировании ветра с помощью оптического лидара. Проекция скорости уменьшается с дальностью и меняет свой знак в пределах длинного импульса. Доплеровский спектр рассеянного сигнала формируется при внутриимпульсной когерентной обработке длинных импульсов, пространственная протяженность которых составляет $\sigma_{r1}/2=900\text{м}$. Профиль отражаемости по трассе регистрируется короткими импульсами τ_{i2} , которые обеспечивают разрешение по дальности $=\sigma_{r2}/2=150\text{м}$.

На рис.7а представлен пример изменения отражаемости σ , во времени, зарегистрированной на шести интервалах дальностях ΔR , которые различаются на 150м. На каждом интервале дальности сплошным, заштрихованным и пунктирным прямоугольниками представлены по 3 значения отражаемости, полученные для трех циклов измерений. Изменение отражаемости во времени происходит за счет смены рассеивателей в зондируемом объеме и их неоднородного распределения в пространстве. На рис.7б в виде сплошных вертикальных отрезков показан доплеровский спектр обратно рассеянного сигнала, полученного одновременно от всех шести интервалов дальности при посылке длинных импульсов. Жирными отрезками и пунктирными отрезками показаны спектры, полученные в последующие моменты времени. На каждой частоте представлены три отрезка, соответствующие трем моментам времени. Переключение режима работы с длинных на короткие импульсы происходит за время, много меньшее, чем время корреляции принимаемых сигналов, так что три доплеровских спектра на рис 7б соответствуют трем профилям отражаемости, показанным на рис.7а.

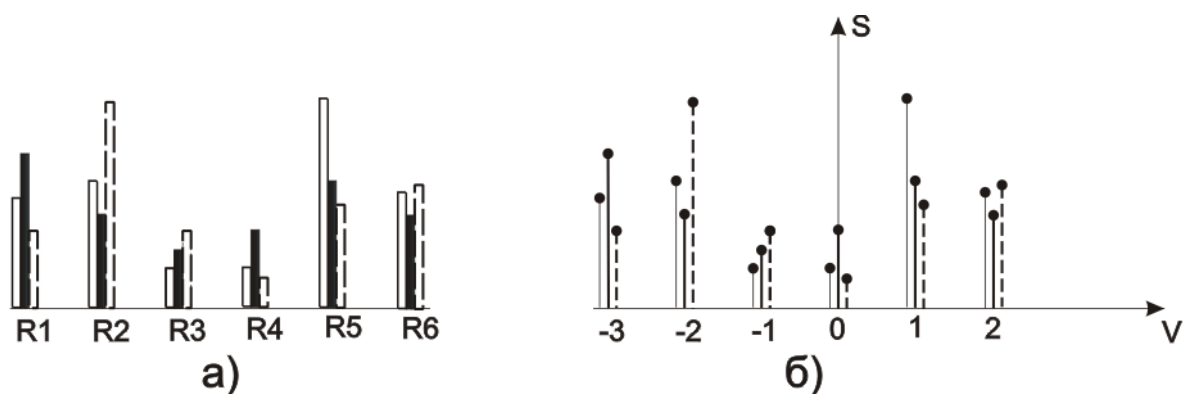


Рис.7. а) зависимость отражаемости от дальности, полученная с помощью коротких импульсов, для трех последовательных циклов измерений, (отмечены разными столбиками). б) спектры, полученные при длинных импульсах для тех же трех циклов.

Первый пример использования предлагаемого способа относится к обнаружению 2 целей, перемещающихся в группе, рис.4. Пусть первая и вторая цели имеют проекции скорости на направление зондирования равные $V_1=400\text{м/с}$ и $V_2=415\text{м/с}$, соответственно, первая при начале измерений располагается на дальности $R_{10}=100530\text{м}$, а вторая - на $R_{20}=100570\text{ м}$. Длина волны РЛС составляет 8 мм. При зондировании длинными импульсами, длительностью $\tau_{и1}/= 0.3 \cdot 10^{-3}\text{с}$ протяженность измеряемого объема составит $\sigma\tau_{и1}/2=45\text{км}$. Положение измеряемого объема в пространстве R будет определяться временем задержки $\tau=2R/C$. В этом случае будет обрабатываться и накапливаться сигнал только с одного участка дальности, на котором располагаются обе цели (см. рис. 4). Внутриимпульсная обработка отраженного сигнала позволяет получить доплеровский спектр, в котором разрешение по скорости составит $\Delta V=\lambda/(2 \cdot \tau_{и1})=13.3\text{м/с}$. По этой причине обе цели в доплеровском спектре дадут два различных максимума, находящихся на соседних доплеровских частотах, рис.5б. Однако, исходя только из спектра, трудно указать какой цели соответствует каждый максимум, лишь с точностью до 45 км можно указать расположение целей.

Для уточнения положения целей по дальности и по скорости проводится зондирование по той же трассе короткими импульсами длительностью $\tau_{и2}= 2 \cdot 10^{-7}\text{с}$ с периодом повторения $T_{повт2}=10^{-3}\text{с}$, обеспечивающей однозначное определение дальности до 150 км. Такая длительность импульса $\tau_{и2}$ обеспечивает разрешение по дальности $\Delta R=c \tau_{и2}/2=15\text{м}$. На рис.5а сплошными прямоугольниками представлен пример отражаемости зарегистрированной в двух элементах объема, находящихся на дальности $R_2=100530\text{м} \pm 15\text{м}$ и дальности $R_3=100560\text{м} \pm 15\text{м}$, которые различаются на 30м. Очевидно, что цель 2, имеющая большую отражаемость, даст на доплеровском спектре большее значение спектральной плотности. Поэтому, даже по одному циклу измерений, проводя корреляцию между отражаемостью и спектральной плотностью доплеровского спектра можно утверждать, что цель 1 имеет дальность $R_1=100530\text{м} \pm 15\text{м}$ и проекцию скорости $V1=400\text{м/с} \pm 8\text{м/с}$, а цель 2 имеет дальность $R_2=100560\text{м} \pm 15\text{м}$ и проекцию скорости $V2=413\text{м/с} \pm 8\text{м/с}$.

На рис.5а пунктиром показаны значения отражаемости через 0,2 секунды. За это время цели сместились в другие пространственные ячейки и изменили отражаемость. Это происходит, например, за счет незначительного изменения ракурса зондирования и интерференции обратно рассеянного когерентного сигнала у сложных целей. Скорости целей за время 0.2 с практически не изменяются, поэтому в спектре на рис..5б лишь изменится спектральная плотность сигналов. Корреляционная обработка между отражаемостью $\sigma(R_j)$ и спектральной плотностью $S(V_i)$ должна проводиться с учетом смещения цели с известной скоростью V_i по трассе. Если циклы измерений проводятся

в моменты времени t_1, t_2, \dots, t_n , а сравнение проводится между отражаемостью цели, расположенной при начальной дальности R_j , и спектральной плотностью на частоте V_i , то ряд X_k значений отражаемости с учетом смещения цели представляет собой $X_k(R_j) = \sigma(R_j + V_i \cdot (t_k - t_q))$. Ряд значений спектральной плотности Y_k , представляет собой спектральную плотность на заданной частоте V_i в различные моменты времени $Y_k = S(V_i, t_k)$. Для каждой дальности R_j , где в начальный момент времени t_1 зарегистрирована цель, формируется функция корреляции (ковариация):

$$K(R_j, V_i) = \sum_k [X_k(R_j) - \overline{X(R_j)}] [Y_k(V_i) - \overline{Y(V_i)}] \quad (3)$$

где величины $\overline{X(R_j)}$ и $\overline{Y(V_i)}$ означают усреднение по всем k . Значение V_i , при котором функция корреляции достигает максимума, и будет являться проекцией скорости цели, которая имела начальное положение R_j .

Второй пример повышения разрешения по скорости и дальности относится к измерению профиля ветра в атмосфере с помощью когерентного СО₂лидара, длина волны которого составляет 10 мкм. При заданной точности измерения ветра $\Delta V = 0,8 \text{ м/с}$, длительность импульса должна составлять $\tau_{\text{ин}} = \lambda / (2 \cdot \Delta V) = 6 \cdot 10^{-6} \text{ с}$, при этом разрешение по дальности составит $\Delta R_1 = c \cdot \tau_{\text{ин}} / 2 = 900 \text{ м}$. Такое разрешение по дальности не удовлетворяет требованиям, предъявляемым к метеорологическим лидарам.

На рис.6 представлен пример повышения разрешения по дальности в такой системе. Пусть дальность зондирования составляет 6 км, тогда период повторения импульсов $T_{\text{повт}}$ может составлять 40 мкс. На первом этапе измерений проводится зондирование трассы пачкой из 100 длинных импульсов длительностью $\tau_{\text{ин}} = 6 \cdot 10^{-6} \text{ с}$ и периодом повторения $T_{\text{повт}} = 40 \text{ мкс}$. Этот процесс занимает 4мс. При этом регистрируются доплеровские спектры $S(V_i)$, усредненные по интервалу $\Delta R_1 = c \cdot \tau_{\text{ин}} / 2 = 900 \text{ м}$. Положение интервала на трассе определяется задержкой сигнала по отношению к стробу запуска импульса. На рис.6 показано одно из расположений импульса протяженностью ΔR_1 на трассе, на примере которого мы рассмотрим методы повышения разрешения. Затем проводится зондирование по той же трассе пачкой из 100 коротких импульсов, длительностью $\tau_{\text{ин}2} = 10^{-6} \text{ с}$ и периодом повторения $T_{\text{повт}} = 40 \text{ мкс}$, которые обеспечивают измерение отражаемости $\sigma(R_j)$ вдоль длинного 900 метрового импульса с разрешением по дальности $\Delta R_2 = 150 \text{ м}$. Этот процесс также занимает 4мс. Полный цикл измерений составит 8мс. При этом участок 900м разделяется на 6 коротких участков R_1, R_2, \dots, R_6 , каждый протяженностью 150м. В приведенном примере проекция скорости ветра уменьшается с дальностью и меняет свой знак в пределах длинного импульса. Поперечное сечение лазерного луча на дальностях работы в несколько километров обычно имеет масштаб 0,5-1м, поэтому смена рассеивателей при типичной скорости ветра 5-10м/с происходит за 0,1-0,2с. С такой периодичностью проводятся следующие циклы измерений. От цикла к циклу скорость ветра не изменяется, (время корреляции поля ветра обычно составляет от нескольких десятков секунд до десятков минут), поэтому положение спектральных составляющих в доплеровском спектре $S(V_i)$ не изменится, а лишь изменится спектральная плотность за счет смены рассеивателей в зондируемом объеме. На рис.7а представлен пример отражаемости $\sigma(R_j, t_k)$ зарегистрированной в моменты времени k -го цикла t_k на шести интервалах дальности R_1, R_2, \dots, R_6 , каждый протяженностью ΔR_2 . На каждом интервале дальности сплошным, заштрихованным и пунктирным прямоугольниками представлены по 3 значения отражаемости, полученные для трех циклов измерений, разделенных по времени на 0,2с. Изменение отражаемости во времени происходит за счет смены рассеивателей в зондируемом объеме и их неоднородного распределения в пространстве. На рис.7б в виде сплошных вертикальных отрезков показан доплеровский спектр обратно рассеянного сигнала,

полученного одновременно от всех шести интервалов дальности при посылке длинных импульсов. Жирными отрезками и пунктирными отрезками показаны спектры, полученные в последующие моменты времени. На каждой частоте представлены три отрезка, соответствующие трем моментам времени. Переключение режима работы с длинных на короткие импульсы происходит за время, много меньшее, чем время корреляции принимаемых сигналов, так, что три доплеровских спектра на рис 7б соответствуют трем профилям отражаемости, показанным на рис.7а.

Для определения проекции скорости, которая соответствует каждому j-му элементу дальности R_j , проводится корреляционная обработка отражаемости $\sigma(R_j, t_k)$ и спектральной плотности $S(V_i, t_k)$ и определяется коэффициент взаимной корреляции

$$K(R_j, V_i) = \frac{\sum_k [\sigma(R_j, t_k) - \bar{\sigma}(R_j)][S(V_i, t_k) - \bar{S}(V_i)]}{\sqrt{\sum_k [\sigma(R_j, t_k) - \bar{\sigma}(R_j)]^2 [S(V_i, t_k) - \bar{S}(V_i)]^2}}$$

где черта над σ и S означает усреднение по всем циклам измерений, проведенным в моменты времени t_k .

Значение проекции скорости V_i , при котором достигается максимум коэффициента корреляции и будет искомой скоростью на R_j интервале дальности. Так определяют проекции скорости ветра на всех элементах дальности. Избирательность функции корреляции и устойчивость к погрешностям измерений и шумам возрастает с увеличением количества циклов измерений [8].

Предложенный способ позволяет улучшить пространственное разрешение и разрешение по скорости за счет последовательного использования длинных импульсов и коротких импульсов. В оптике способ позволяет работать на более длинных волнах, что облегчает техническую задачу совмещения фронтов опорного и принимаемого излучения и облегчает когерентную внутриимпульсную обработку отраженных сигналов. В радиодиапазоне способ позволяет использовать не координатные методы определения скоростей целей, а более точные методы определения скоростей целей при внутриимпульсной когерентной обработке. Рассмотренный способ может найти применения и в акустике.

Заключение

В настоящее время проект, выполняемый в рамках Федеральной целевой программы «Геофизика», по нашим данным испытывает определенные затруднения, связанные с проблемой измерения опасных скоростей метеообразований на больших дальностях. Снижение дальности измерения до 125км, вместо заявленных на начальных этапах 250 км, улучшает возможность измерения скорости, однако надежность определения опасных явлений с высокими скоростями и интенсивной турбулентностью невысока. К тому же уменьшение дальности снижает заблаговременность прогноза опасности. Разработанные нами корреляционные методы снятия неоднозначности измерения скорости на больших дальностях, по-видимому, позволят решить эту проблему. Очевидно, что поставленная задача имеет высокую значимость, поэтому нам представляется целесообразным постановка и проведение специальных прикладных работ в данном направлении.

Литература

1. В. С. Ефремов, Б. М. Вовшин, И. С. Вылегжанин, В. В. Лаврукевич, Р. М. Седлецкий. Поляризационный доплеровский метеорологический радиолокатор С-диапазона со сжатием импульсов. Журнал радиоэлектроники, №10, 2009.
2. Жуга Г.А., Вовшин Б.М., Лаврукевич В.В., Извлечение метеоинформации на основе спектрального и корреляционного анализа отражений в импульсных доплеровских метеорологических РЛС // Прикладная радиоэлектроника, т. 6 № 4. 2007, стр. 491-510.
3. Стерлядкин В.В. Способ снятия неоднозначности измерения дальности и скорости для импульсно- доплеровских систем. Решение о выдаче патента от 13.01.2014 г по заявке № 2012152246. 5 с.
4. Стерлядкин В.В. Корреляционный способ повышения разрешения по скорости и дальности для импульсных доплеровских систем с внутриимпульсной когерентной обработкой. Решение о выдаче патента от 03.02.2014г по заявке № 20121157044. 5 с.
5. Белый Ю.И., Мареев А.Ю. Способ измерения дальности и скорости импульсно- доплеровской радиолокационной станцией. Патент РФ, RU №2206102 С1, 10.06.2003. Бюл. № 16.
6. Леховицкий Д.И. и др. Модифицированный метод парных импульсов для когерентных, импульсных МРЛ с произвольными интервалами зондирования. Успехи современной радиоэлектроники. №3, 2012.
7. Стерлядкин В.В. Метод снятия неоднозначности измерения дальности и скорости для импульсных доплеровских систем. Труды XXVIII Всероссийского симпозиума “Радиолокационное исследование природных сред”, ВКА им. Можайского, СПб, 2013г.с.118-126.
8. Стерлядкин В.В. Корреляционно доплеровская реконструкция поля скоростей. Известия АН СССР, сер. Физика атмосферы и океана. Т.30, №5, 1994, с.623-629.
9. Смалихо И.Н., Рам Ш. Измерения когерентными доплеровскими лидарами параметров самолетных вихрей // Оптика атмосферы и океана. 2008. Т. 21, № 11. С. 977–992.