

## **Повышение эффективности мониторинга опасных метеорологических явлений**

Д.А.Иванников

АО «ННПО им.М.В.Фрунзе», 603009, г.Н.Новгород, пр.Гагарина, 174;E-mail: ccs5000@mail.ru.

*Рассматриваются три подхода к повышению эффективности мониторинга опасных метеорологических явлений.*

*Первый основан на модернизации некогерентного метеорадиолокатора на примере МРЛ-5 для возможности оценки ширины доплеровского спектра. Данный результат достигается путем реализации алгоритмов псевдокогерентной частотной обработки сигналов с субдискретизацией. Проведено математическое моделирование узлов, изготовлены их макеты, подтверждающие техническую реализуемость данных алгоритмов. На основании математического анализа получены выражения и приведены графики коэффициента подавления системы СДЦ при действии мощных пассивных помех с гауссовой функцией корреляции в зависимости от параметров субдискретизации.*

*Второй подход предлагает способ повышения эффективности мониторинга таких опасных метеорологических явлений, как турбулентность. Предложен алгоритм обнаружения зон повышенной турбулентности и оценки их параметров. Основу данного алгоритма составляет преобразование видеосигналов от двух импульсных объемов облаков в двух ортогональных каналах. Получены уравнения, на базе которых синтезированы алгоритмы обнаружения и оценки нормированной ширины доплеровского спектра зон повышенной турбулентности, а также определения уровня мощности отраженных сигналов от облаков и их индикация.*

*Третий подход описывает способ повышения достоверности обнаружения грозových очагов и точности их местоопределения за счет применения в дополнение к МРЛ-5 магнитометрической аппаратуры оценки геофизических явлений и расширения за счет этого полноты получаемых данных. Приведен пример реализации такой аппаратуры, ее краткие технические характеристики.*

*Ключевые слова:* мониторинг опасных метеорологических явлений, метеорадиолокатор, псевдокогерентная частотная обработка, ортогональные сигналы, доплеровский спектр, магнитометрическая аппаратура.

## **Improving the effectiveness of monitoring of dangerous meteorological phenomena**

D.Ivannikov

JSC «Nizhny Novgorod scientific and production association of M.Frunze», 603009, Nizhny Novgorod, Gagarina, 174;E-mail: ccs5000@mail.ru.

*Three approaches to improving the effectiveness of monitoring of dangerous meteorological phenomena are considered.*

*The first one is based on the modernization of the incoherent weather radar using the example of the MRL-5 to be able to estimate the width of the Doppler spectrum. This result is achieved by implementing algorithms for pseudo-coherent frequency signal processing with subsampling. Mathematical modeling of the nodes was carried out, their models were made, confirming the technical feasibility of these algorithms. On the basis of mathematical analysis, expressions are obtained and graphs of the suppression coefficient of the SDC system under the action of powerful passive interference with a Gaussian correlation function depending on the parameters of the subsampling are presented.*

*The second approach offers a way to improve the effectiveness of monitoring such dangerous meteorological phenomena as turbulence. An algorithm for detecting zones of increased turbulence and estimating their parameters is proposed. The basis of this algorithm is the conversion of video signals from two pulsed cloud volumes in two orthogonal channels. Equations are obtained, on the basis of which algorithms for detecting and estimating the normalized width of the Doppler spectrum of zones of*

*increased turbulence, as well as determining the power level of reflected signals from clouds and their indication are synthesized.*

*The third approach describes a way to increase the reliability of the detection of thunderstorms and the accuracy of their location by using, in addition to the MRL-5, magnetometric equipment for assessing geophysical phenomena and thereby expanding the completeness of the data obtained. An example of the implementation of such equipment, its brief technical characteristics is given.*

*Keywords: monitoring of dangerous meteorological phenomena, weather radar, pseudocoherent frequency processing, orthogonal signals, Doppler spectrum, magnetometric equipment.*

## **Введение**

В последние десятилетия значительно возросла необходимость получения оперативной информации об опасных явлениях в атмосфере с целью своевременного принятия мер по защите здоровья людей и обеспечения надежной и безопасной работы промышленных и сельскохозяйственных предприятий, транспорта, связи и др. К опасным явлениям в атмосфере относятся, в частности, области формирования грозных фронтов, турбулентностей, выпадения интенсивных дождей, снежных бурь.

С целью получения такой информации широко используются метеорологические радиолокаторы (МРЛ), объединенные в многофункциональные сети и позволяющие контролировать метеобстановку в реальном масштабе времени [1]. Так, один МРЛ обрабатывает информацию с территории, площадью более 40 тыс. кв.км.

В настоящее время в сети «МРЛ-Штормооповещения» эксплуатируются 28 комплектов метеорологических радиолокаторов типа МРЛ-5 [2]. На сегодняшний день они полностью выработали свой технический ресурс. В связи на повестке часто встает вопрос: целесообразно ли проведение модернизации существующей сети МРЛ? Переход на использование в конструкции МРЛ твердотельных модуляторов и усилителей, цифровых приемников и когерентной обработки сигналов, несомненно, является значительным шагом в повышении функционала МРЛ. Однако это сопровождается значительным усложнением схмотехники, конструкции и, главное – существенным увеличением стоимости локатора.

Кроме того, входящие в сеть «МРЛ-Штормооповещение» МРЛ-5 работают в диапазоне S (10 см), что особенно эффективно при наблюдении низкой облачности как в зимних условиях, так и в условиях плотной стены облаков, приближающегося шторма или града. В диапазоне S-волн отработаны критерии распознавания категорий объектов воздействия и выполнение противогородовых операций. Разработанный же, например, Лианозовским электромеханическим заводом «ДМРЛ-С» представляет собой радиолокатор диапазона С-волн (5,3 см). В условиях значительного ослабления сигналов диапазона С-волн в облаках и осадках, в том числе, в субтропиках и тропиках, где отмечаются мощные грозоградовые облака, ураганы, торнадо и осадках, их применение ограничено зоной аэропортов.

На рынке присутствует «Контур-Метео», разработанный в ОАО «Ленинец» (Санкт-Петербург), а также зарубежные «ММР-42» фирмы «MicroStep-MIS» (Словакия) и «MiniMax 100С» фирмы «ElectronicEnterpriseCorporation» (США). Эти аналоги также практически не приемлемы для наблюдения мощных грозо-градовых облаков и применения в системе противогородовой защиты, защиты от ливневых паводков и селей по следующим причинам:

- на длине волны X (3,2 см), на которой работают эти МРЛ, в грозо-градовых облаках и интенсивных ливневых осадках наблюдается интенсивное ослабление радиоволн, зачастую приводящее к полной экранировке дальних очагов осадков ближними;
- чрезмерно малые размеры антенны (0,7-1,0 м) приводят к большой ширине луча (около 3 градусов) и низкой разрешающей способности по азимуту и углу места.

Эти два фактора в совокупности снижают достоверность информации и лишают целесообразности применения этих МРЛ при мониторинге опасных метеоявлений и штормооповещении.

В связи с вышесказанным проведение модернизации МРЛ-5 с одновременным повышением эффективности мониторинга опасных метеорологических явлений в условиях ограниченного финансирования, является актуальным.

### **Первый подход к повышению эффективности мониторинга опасных метеоявлений**

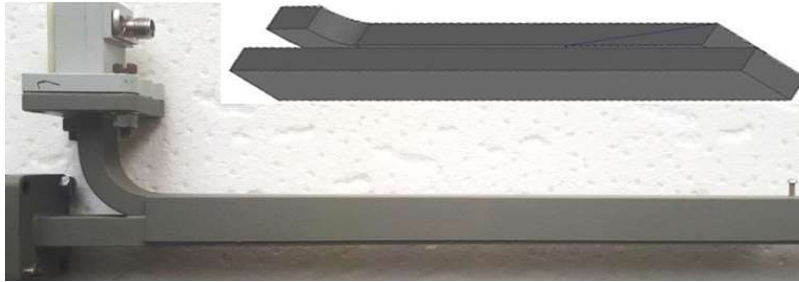
Одной из ключевых задач при модернизации некогерентного метеорадиолокатора на примере МРЛ-5 является получение возможности оценки ширины доплеровского спектра и на основе этого существенного расширения объема получаемой информации о метеоявлениях. При введении в МРЛ-5 доплеровского режима частота радиолокационных сигналов, отраженных от перемещающихся объектов (облаков, осадков), отличается от частоты излучаемого сигнала на величину, пропорциональную радиальной составляющей скорости перемещения. При этом помимо отражаемости появляются данные о средней радиальной составляющей скорости и ширине доплеровского спектра радиальных скоростей. Введение доплеровского режима в МРЛ-5 позволит получать доплеровскую информацию:

- радиальную составляющую скорости гидрометеоров
- обнаруживать сдвиги ветра в тропосфере и ее приземном слое, создающие значительную опасность при взлете и посадке воздушных судов;
- определять локальные вращения (турбулентности) масс воздуха.

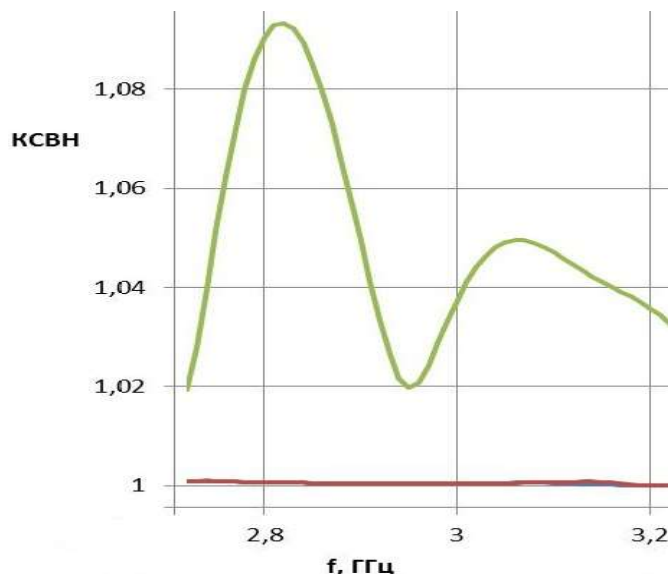
Применение цифровой обработки сигналов в реальном времени на современных АЦП, сигнальных процессорах и ПЛИС позволяет реализовать в МРЛ-5 алгоритмы псевдокогерентной частотной обработки сигналов с субдискретизацией, основанные на запоминании фазы излученного высокочастотного сигнала и сравнении с ней фазы принятого сигнала с последующей одноканальной оцифровкой на промежуточной частоте. Это дает возможность получить оценку ширины доплеровского спектра и на ее основе существенно расширить объем получаемой информации о метеоявлениях. Реализация одноканальной цифровой обработки сигналов позволяет сократить объем аппаратуры, повысить ее надежность и устранить влияние неидентичности квадратурных каналов на эффективность цифровых систем обработки.

Предлагаемая модернизация МРЛ-5 для псевдокогерентной частотной обработки не представляет значительных трудностей и реализуется при незначительных финансовых затратах (существенно более низких, чем для нового ДМРЛ).

Для апробации предлагаемых решений было проведено моделирование и дальнейшее макетирование ответвителя-аттенюатора, необходимого для передачи в систему ЦОС излучаемого магнетроном сигнала с целью запоминания его фазы. Ответвитель выполнен в виде отрезка волновода длиной 600...800 мм. Он обеспечил коэффициент затухания сигнала более 60 дБ. На рис.1-3 приведены внешний вид макета направленного ответвителя и графики, отражающие соответственно КСВ и коэффициент затухания по его портам.

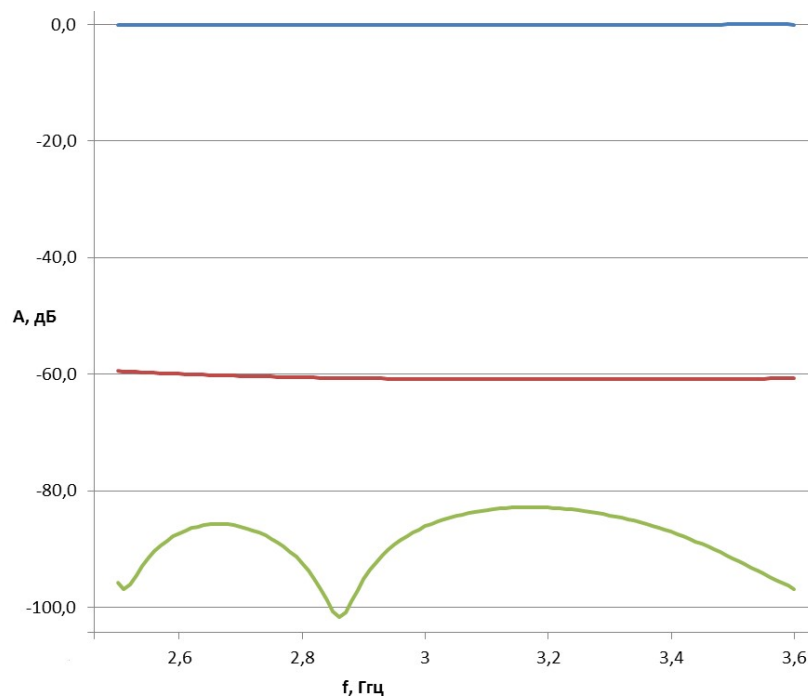


**Рис.1. Математическая модель и внешний вид макета направленного ответвителя**



**Рис. 2. КСВ направленного ответвителя по его портам**

На рисунке обозначено: синим цветом – КСВ в прямом канале (0 дБ), красным – в канале отвода на АЦП (более 60 дБ), зеленым – затухание на согласованной внутренней нагрузке



**Рис. 3. Коэффициент затухания направленного ответвителя по его портам**

На рисунке обозначено: синим цветом – затухание в прямом канале (0 дБ), красным – в канале отвода на АЦП (более 60 дБ), зеленым – затухание на согласованной внутренней нагрузке

На втором этапе была реализована одноканальная обработка сигналов для оценки ее эффективности при работе системы селекции движущихся целей (СДЦ).

Полагаем, что при взятии выборок из сигнала с временным разнесением  $\Delta$ , равным сумме целого числа и четверти периода, возникает сдвиг фаз между выборками сигнала  $\pi/2$ . Очевидно, что при этом сигналы, представляемые данными отсчетами, будут сопряжены по Гильберту и их можно рассматривать как квадратурные составляющие одного сигнала. Такое представление сигнала получило название субдискретизации.

В предлагаемом варианте цифровой обработки дискретных сигналов (рис.4) с периодом следования  $T$ , сигнал с выхода УПЧ частотой  $f_0 = 1/T_0$  и синхронизирующие импульсы с интервалом  $\Delta$ , подаются на АЦП. Из полученных в результате этого выборок сигнала в моменты времени  $t_i = iT$  и  $t_i + \Delta$ , где  $i \in [0, \infty)$ , формируются отсчеты комплексной огибающей. При этом один отсчет образует косинусную, а другой – задержанный на  $\Delta$  – синусную составляющие комплексного сигнала. Частота дискретизации выбирается выше удвоенной ширины спектра сигнала, но значительно (на порядок) ниже промежуточной частоты. Информация о фазовой структуре входного сигнала при этом полностью сохраняется.

После формирования отсчетов комплексной огибающей производится обычная квадратурная обработка сигналов, которая заключается в вычислении межпериодного коэффициента корреляции  $\dot{K}_v$ , а затем по его аргументу – оценки скорости.

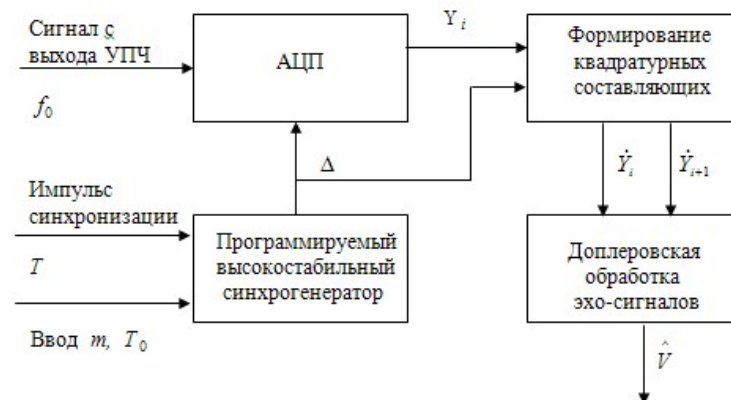


Рис. 4. Структурная схема доплеровской обработки на промежуточной частоте с субдискретизацией

Для анализа алгоритма псевдокогерентной обработки сигнала представим дискретизированные сигналы в моменты  $t_i$  и  $t_{i+1}$  в аналитическом виде:

$$\dot{Y}(t_i) = Y(t_i) + jY(t_i + \Delta), \quad \dot{Y}(t_{i+1}) = Y(t_{i+1}) + jY(t_{i+1} + \Delta).$$

Полагаем, что в периоде  $T$  берется количество выборок  $N: T = N\Delta$ , где  $\Delta = mT_0 + T_0/4 = T_0(m+1/4)$ ,

$m = \overline{0 \dots N}$  – число целых периодов между выборками.

Для вычисления оценки скорости найдем функцию взаимной корреляции выборок  $Y(t_i)$  и  $\dot{Y}(t_{i+1})$ :

$$\dot{K}_v = \frac{1}{2} M \{ \dot{V}(t_i) \dot{V}^*(t_{i+1}) \} = \frac{1}{2} M \{ (V(t_i) + jV(t_i + \Delta)) \{ (V(t_{i+1}) - jV(t_{i+1} + \Delta)) \} \} \quad (1)$$

Тогда оценка средней скорости, согласно [2], будет описываться соотношением:

$$\hat{V} = -(\lambda / 4\pi T) \arg \dot{K}_v(T), \quad (2)$$

где  $\lambda$  – длина волны несущего колебания.

Аргумент функции  $\dot{K}_v(T)$  выражен в радианах, а знак минус указывает на то, что положительным доплеровским сдвигам частоты соответствуют отрицательные скорости.

Для конкретного анализа сигнал на выходе АЦП в моменты времени  $t_i$  можно представить в виде  $Y(t_i) = A(t_i) \cos(\omega_0 t_i + \Omega_d t_i + \varphi)$ .

Тогда для отсчета, задержанного на  $\Delta$ ,  $\omega_0 \Delta = \omega_0 k T_0 + \omega_0 T_0/4 = 2k\pi + 2\pi/4 = \pi/2$ ,

и сигнал в момент  $t_i + \Delta$  примет вид  $Y(t_i + \Delta) = A(t_i + \Delta) \sin(\omega_0 t_i + \Omega_d t_i + \varphi + \Omega_d \Delta)$ .

Аналогично находятся квадратурные составляющие выборки в момент времени  $t_{i+1}$  и  $t_{i+1} + \Delta$ . Исходя из предположения, что функции, описывающие сигналы – эргодические, их среднее значение по времени совпадает со средним значением по множеству. С учетом этого, выражение (1) приведем к виду:

$$\dot{K}_v = \frac{1}{2} K(T) \cos(\Omega_d T) + j \frac{1}{4} K(T-\Delta) [\sin(\Omega_d T - \Omega_d \Delta) + \sin(\Omega_d T + \Omega_d \Delta)]$$

При условии, что корреляционная функция сигнала имеет гауссовский вид, получим:

$$K(T+\Delta) = K(T-\Delta) = K(T) \exp(-\alpha \Delta^2).$$

Используя формулу суммы синусов, получим следующее выражение для функции взаимной корреляции:

$$\dot{K}_v = \frac{1}{2} K_A(T) [\cos(\Omega_d T) + j \sin(\Omega_d T) \cos(\Omega_d \Delta) \exp(-\alpha \Delta^2)]^{0.5}, \quad (3)$$

подставляя которое в выражение (2) получим оценку средней скорости.

Для оценки качества измерения параметров сигнала на фоне мощных пассивных помех, необходимо рассмотреть влияние введения субдискретизации на работу системы СДЦ.

Одним из параметров, характеризующих эффективность системы СДЦ, является коэффициент подавления пассивной помехи режекторного фильтра. Проанализируем зависимость коэффициента подавления на примере однократной и двукратной систем ЧПВ при различных параметрах периода дискретизации.

Коэффициенты подавления нормированные для систем ЧПВ<sub>1</sub> и ЧПВ<sub>2</sub> описываются

$$\text{соотношениями [3]} K_{\text{пн1}} = \frac{1}{1 - \rho_1}, K_{\text{пн2}} = \frac{1}{1 - \frac{4}{3}\rho_1 + \frac{1}{3}\rho_2},$$

где  $\rho_i = \rho(\Omega_d, iT, \Delta)$  – межпериодные коэффициенты корреляции сигнала, связанные с

$$\text{функцией взаимной корреляции соотношением } \rho = \frac{|\dot{K}_v|}{\frac{1}{2}K(T)}.$$

Из формулы (3) следует:

$$|\dot{K}_v| = \frac{1}{2} K_A(T) [\cos^2(\Omega_d T) + \sin^2(\Omega_d T) \cos^2(\Omega_d \Delta) \exp(-2\alpha \Delta^2)]^{0.5}.$$

Тогда

$$\rho(\Omega_d, iT, \Delta) = [\cos^2(\Omega_d iT) + \sin^2(\Omega_d iT) \cos^2(\Omega_d \Delta) \exp(-2\alpha \Delta^2)]^{0.5}$$

Как было сказано выше, период дискретизации  $\Delta$  определяется числом целых периодов  $m$ , поэтому анализ влияния периода дискретизации на коэффициент подавления будем проводить при различных значениях  $m$ .

Расчеты проводились с использованием программного продукта MathCad. Для  $m = 0$ ,  $T_0 = 1$  (с),  $F_d = 0 \dots 0.35$  (Гц),  $\Omega_d(F_d) = 2\pi F_d$  (рад/с),  $\Delta(k) = mT_0 + T_0/4$  (с),

$\Phi(F_d) = \Omega_d(F_d)T$  (рад),  $E(m) = \exp(-2\Delta(m)^2)$  графики зависимости коэффициента подавления для ЧПВ<sub>1</sub> и ЧПВ<sub>2</sub> приведены на рис.5.

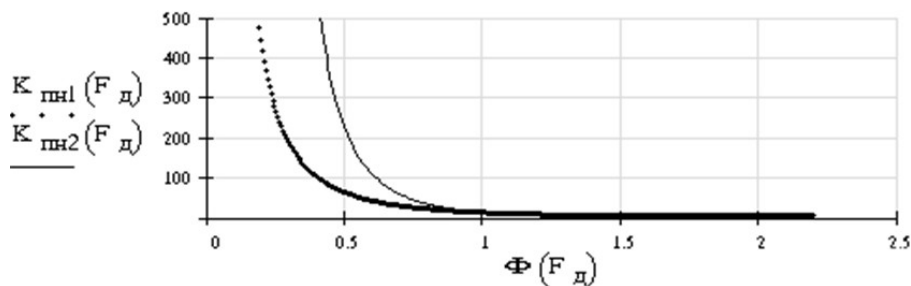


Рис. 5. Коэффициенты подавления систем ЧПВ<sub>1</sub> и ЧПВ<sub>2</sub> при  $m = 0$ .

Аналогично проведены расчеты коэффициентов подавления для  $m = 1$ . Полученные графики изображены на рис.6.

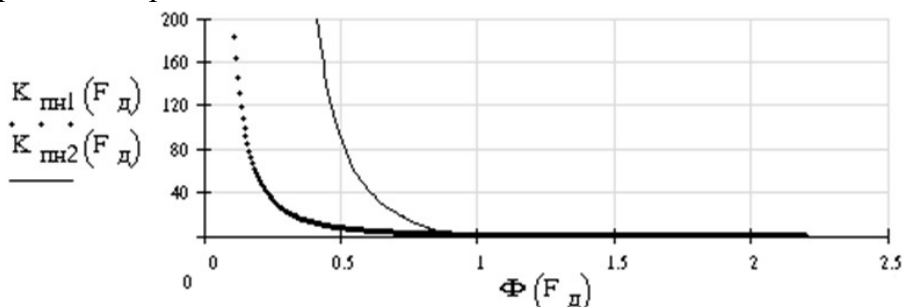


Рис. 6. Коэффициенты подавления систем ЧПВ<sub>1</sub> и ЧПВ<sub>2</sub> при  $m = 1$ .

Как видно из приведенных выше графиков, при увеличении  $m$  и снижении частоты дискретизации сигнала коэффициент подавления падает достаточно быстро. Увеличение фазового сдвига также приводит к его снижению. Поэтому для снижения энергетических потерь за счет субдискретизации необходимо, чтобы период взятия выборок был значительно меньше длительности зондирующего импульса, то есть  $\Delta \ll \tau_u$ .

Использование неэквидистантных последовательностей импульсов в МРЛ-5 позволит расширить пределы однозначного измерения частоты Доплера и уменьшить величины максимальных провалов частотной характеристики систем ЧПВ.

### **Второй подход к повышению эффективности мониторинга опасных метеоявлений**

Зоны повышенной турбулентности являются фактором, определяющим образование и развитие облаков различных форм, атмосферных фронтов, циклонов [4]. Кроме того, они представляют особую опасность для полетов различных летательных аппаратов, нарушают связь, формируют смерчи и т.п. [5], поэтому получение информации об интенсивности турбулентности, ее пространственной и спектральной структуре в облаках различных форм, оценки параметров зон повышенной турбулентности является важной задачей.

При анализе и систематизации радиолокационных исследований зон повышенной турбулентности в облаках и осадках необходимо учитывать особенности метеорологических объектов и влияние параметров метеорологических радаров, а также проводить анализ и более полно использовать признаки появления зон повышенной турбулентности в облаках и осадках.

Известно, что облака и осадки представляют собой систему из множества взвешенных (или выпадающих) пространственно-распределенных гидрометеоров (капли, кристаллы и т.п.). Если размер их меньше, чем размер длин волн, то они рассеивают в так называемой

рэлеевской области. Для распределенных целей эффективная поверхность рассеяния (ЭПР) определяется соотношением [4]:

$$\sigma = V_{\tau} \eta, \quad (4)$$

где  $\eta$  – удельная отражающая способность облаков на единицу объема,  
 $V_{\tau}$  – импульсный объем,

$$\eta = \sum_{i=1}^N \sigma_i \quad (5)$$

где  $N$  – количество точечных отражателей в единице объема;

$\sigma_i$  – значение удельной ЭПР  $i$ -го точечного отражателя;

$$V_{\tau} = \frac{c\tau_1}{2} \pi \frac{\theta_{\alpha}\theta_{\beta}R^2}{4}, \quad (6)$$

где  $c = 3 \cdot 10^8$  м/сек – скорость распространения света;

$\tau_1$  – длительность сигнала на выходе согласованного фильтра;

$\theta_{\alpha}, \theta_{\beta}$  – диаграммы направленности антенны по азимуту и углу места;

$R$  – расстояние до облака.

В соответствии с соотношением (4) при анализе отраженных сигналов от облаков следует учитывать зависимость изменения импульсного объема  $V_{\tau}$ , а, следовательно, и эффективной отражающей поверхности от расстояния  $R$  между радаром и облаком.

Влияние параметров метеорологических радаров на точность оценки пространственной и спектральной структуры облаков различных форм следует из соотношения для удельной отражающей способности  $\eta$  облаков [2,4]:

$$\lg \eta = 0,1q + 2\lg R - \lg C_{\lambda}, \quad (7)$$

где  $q$  – пороговое отношение сигнал/шум на входе приемника радара;

$R$  – расстояние до облака;

$C_{\lambda}$  – константа, характеризующая потенциал метеорологического радара и определяемая

$$\lg C_{\lambda} = \lg P_{\text{и}} + 2\lg G + 2\lg \lambda + \lg \tau_{\text{и}} + \lg \theta_{\alpha} + \lg \theta_{\beta} - \lg P_{\text{ш}} - 0,1 \zeta + 6,63, \quad (8)$$

где  $P_{\text{и}}$  – импульсная мощность излучения (Вт);

$G$  – коэффициент усиления антенны;

$\tau_{\text{и}}$  – длительность импульса, (с);

$\zeta$  – суммарное затухание, вносимое СВЧ – трактом, (дБ);

$\lambda$  – длина волны, (см);

$\theta_{\alpha}, \theta_{\beta}$  – ширина ДНА в азимутальной и вертикальной плоскостях, (рад);

$R$  – расстояние до метеобъекта, (см).

Как видно из представленных выражений, точность измерения отражаемости от метеорологических объектов значительно зависит от величины и стабильности потенциала  $C_{\lambda}$ , поэтому необходимо обеспечить:

– функционирование метеорологического радара с оперативным контролем его основных параметров перед проведением метеорологических наблюдений с помощью встроенной автоматизированной контрольно-измерительной аппаратуры, например, энергетического потенциала радара с точностью до 3 дБ относительно номинального значения;

– автоматизацию процесса измерений радиолокационной отражаемости метеорологических объектов при введении коррекции сигналов на расстоянии по закону  $1/R^2$  в диапазоне не менее 36 дБ с шагом 6дБ и точностью  $\pm 1,5$  дБ с помощью ступенчатого СВЧ аттенюатора;

Проведем исследования основных признаков повышенной турбулентности в облаках и осадках.

Существующие эмпирические модели атмосферной турбулентности основываются на экспериментальных данных, полученных во время полетов самолетов и радиолокационных измерений. При этом следует отметить многообразие причин возникновения атмосферной турбулентности, вследствие чего различают термические,



динамические и механические атмосферные турбулентности [5]. Общими признаками их являются более, чем на порядок увеличение интенсивности отражений и пульсаций скорости ветра, а также возникновение контраста температур. Турбулентные порывы ветра вовлекают в свое движение частички облаков и осадков, которые являются рассеивателями энергии, излучаемой метеорологическим радаром, поэтому повышение интенсивности турбулентности приводит к уменьшению взаимной корреляционной функции отраженных сигналов от импульсных объемов облаков, разнесенных в пространстве.

С помощью прямого преобразования Фурье от взаимной корреляционной функции проводится оценка ширины спектров отраженных сигналов, которые связаны со среднеквадратическим отклонением скорости ветра следующим образом [4]:

$$\Delta F_d = \frac{\sqrt{2}\sigma_v}{\lambda}, \quad (9)$$

где  $\Delta F_d$  – ширина спектра отраженных сигналов;

$\sigma_v$  – среднеквадратическое отклонение скорости ветра;

$\lambda$  – рабочая длина метеорологического радара.

Данная связь скорости ветра с шириной спектра отраженных сигналов используется для обнаружения областей в облаках и осадках с высоким уровнем турбулентности. Точность оценки ширины спектра отраженных сигналов в значительной степени определяется частотой следования зондирующих импульсов радара, скоростью движения антенны, уровнем когерентности приемо-передающей аппаратуры и т.п.

Вторым важным признаком зон повышенной турбулентности в облаках является значительное увеличение отражаемости сигналов за счет образования крупных капель при их слиянии в результате столкновений (так называемая коагуляция) при наличии восходящих потоков воздуха. Например, увеличение диаметра капли в 2 раза приводит к росту отражаемости в 64 раза.

Таким образом, восходящие потоки воздуха и турбулентность оказывают содействие конденсации и коагуляции, а значит, росту размеров капли и увеличению радиолокационной отражаемости, поэтому высокая радиолокационная отражаемость является важным признаком зоны повышенной турбулентности.

Существует ряд методик обнаружения зон повышенной турбулентности в облаках и осадках на основе выше приведенных связей между турбулентностью и характеристиками отраженных радиолокационных сигналов, которые находят практическое применение. Основу алгоритмов радиолокационного обнаружения зон повышенной турбулентности в облаках и осадках составляют оценка ширины спектров и радиолокационной отражаемости сигналов от двух импульсных объемов, разнесенных в пространстве в соответствии с масштабом турбулентности.

В [6] разработаны устройство и методика решения задачи обнаружения и оценки параметров зон опасной турбулентности за счет предварительного преобразования отраженных сигналов в двух ортогональных каналах, что позволило сформировать алгоритмы, содержащие достаточно полную информацию о зонах опасных турбулентностей. Устройство содержит три канала:

- канал суммы сигналов;
- канал доплеровских сигналов;
- канал разностных сигналов.

Канал суммы сигналов предназначен для формирования суммарной мощности отраженных сигналов от разнесенных в пространстве импульсных объемов облаков и осадков. Канал доплеровских сигналов предназначен для определения параметров сигналов, отраженных от зоны повышенной турбулентности, в части оценки ширины спектров отраженных сигналов. Канал разностных сигналов предназначен для оценки

изменения интенсивности отраженных сигналов от разнесенных в пространстве двух импульсных объемов облаков.

Предложенная методика преобразования отраженных сигналов дает возможность получить достаточно полную информацию о зонах опасных турбулентностей, что позволяет синтезировать общие алгоритмы оценки нормированной ширины доплеровского спектра, интенсивности отражения, обеспечить их надежное обнаружение и информативную индикацию.

### **Третий подход к повышению эффективности мониторинга опасных метеоявлений**

Современные тенденции развития и модернизации систем место определения грозовых очагов, как одних из наиболее опасных метеоявлений связаны с применением магнитометрической аппаратуры оценки геофизических явлений.

Известно, что магнитное поле Земли является геофизическим фактором, который отражается на динамике опасных метеоявлений. В таблице 1 приведены ряд опасных метеорологических явлений и виды информативных полей, в которых они проявляются.

Таблица 1. Связь опасных метеорологических явлений и информативных полей

Опасное метеорологическое явление	Проявление в информативных полях	
	Вариации Е-поля	Вариации Н-поля
Атмосферики	+	+
Магнитные бури	+	+
Эл.-магнит. резонансы Шумана	+	+
Разряды молний	+	+
Сильный туман	+	-
Сильные осадки	+	+

Указанное выше подтверждает целесообразность дополнения МРЛ-5 магнитометрической аппаратурой оценки геофизических явлений для повышения эффективности мониторинга опасных метеорологических явлений, например, грозовых очагов.

Магнитометрическая аппаратура должна включать пассивные каналы оценки вариации электрического и магнитного полей в диапазоне от единиц килогерц до единиц мегагерц, сопровождающие молниевые разряды. При этом для получения полного вектора электрического и магнитного полей (ЭМП) необходимо обеспечить приемную аппаратуру в трехканальном исполнении (X, Y, Z-составляющие).

В рамках ФЦП разработана аппаратура и алгоритмы оценки энергетических характеристик таких ЭМП, а также местоопределения их источников.

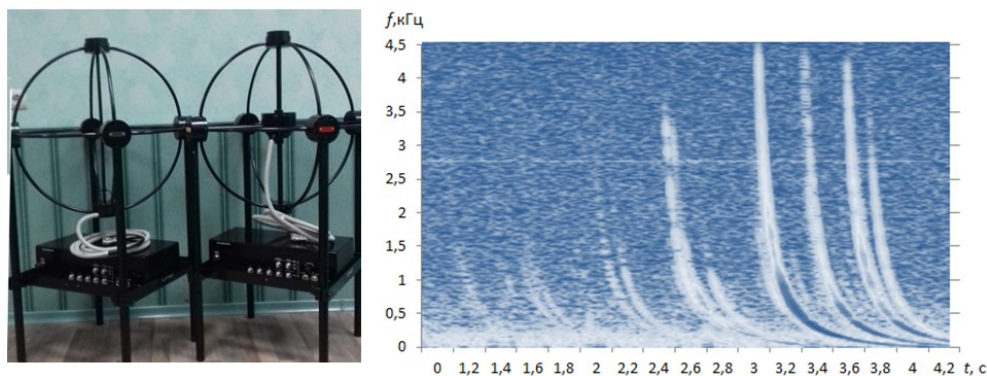
Краткие характеристики аппаратуры:

- Рабочий диапазон частот 1 кГц-1 МГц;
- Динамический диапазон оценки напряженностей магнитной и электрической составляющих ЭМП – не менее 128 дБ;
- Чувствительность (в наименьшей полосе анализа) – не хуже 0,6 фТл (0,5 нА/м);
- Пределы основной погрешности оценки напряженностей ЭМП – не более 2 дБ;
- Пределы основной погрешности оценки частоты – не более  $\Delta f = \pm(f * \delta_0 + \Delta F)$  Гц,

где  $f_0$  – значение частоты, на которой производится измерение, Гц;  $\delta_0$  – относительная нестабильность частоты опорного генератора ( $5 \cdot 10^{-6}$  в режиме внутренней синхронизации) в диапазоне рабочих температур;  $\Delta F$  – полоса анализа из списка фиксированных значений, Гц;

- Полосы анализа сигналов –  $(19 \cdot 2^m)$  Гц, где  $0 \leq m \leq 4$ ;
- Пределы допускаемой основной погрешности маркирования фронтов сигналов – не более  $\Delta = (1/f_d + \Delta t_{PPS} + |1/[f_d] - 1/(f_d \pm \Delta f)| * N)$  с, где  $f_d$  – расчетное значение частоты дискретизации,  $\Delta t_{PPS}$  – погрешность временной привязки фронта PPS-сигнала GPS-ГЛОНАСС приемника ( $\Delta t_{PPS} = \pm 100$  нс для встроенных GPS-ГЛОНАСС систем),  $\Delta f$  – смещение  $f_d$  за счет дискретности подстройки кварцевого генератора по PPS-сигналу в режиме внутренней синхронизации,  $[f_d]$  – целая часть расчетного значения частоты дискретизации.
- Вид канала передачи данных – волоконно-оптическая линия связи /Ethernet.
- Стойкость к воздействию климатических воздействующих факторов: УХЛ1 ГОСТ 15150.

Внешний вид магнитометрической аппаратуры оценки геофизических явлений и результат частотно-временной обработки сигналов приведены на рис.7.



**Рис. 7. Внешний вид магнитометрической аппаратуры оценки геофизических явлений и результат частотно-временной обработки ЭМП.**

Необходимо отметить, что данная аппаратура позволяет фиксировать волновые формы и спектр ЭМП в реальном масштабе времени. С учетом наличия встроенной высокоточной системы единого времени (GPS/Глонасс), возможности подключения внешнего рубидиевого стандарта частоты и времени, возможности работы в составе пространственно-разнесенной сети и синхронизации данных по сети Ethernet с другой аппаратурой, она, в дополнение к МРЛ-5 обеспечит повышение эффективности мониторинга грозовой опасности. При этом аппаратура позволяет использовать разностно-дальномерные, пеленгационные (угломерные) и интерферометрические алгоритмы оценки местоположения гроз.

С учетом значительного увеличения с помощью указанной аппаратуры мониторинга электромагнитных полей полноты данных, точности прогнозов местоположения грозowych очагов, а также ее невысокой стоимости, целесообразно дополнение указанной аппаратурой каждой позиции, размещающей МРЛ-5.

### **Заключение**

Рассмотренные подходы к повышению эффективности мониторинга опасных метеорологических явлений. Приведены результаты математического моделирования и

макетирования, подтверждающие принципиальную возможность значительного повышения эффективности мониторинга опасных метеоявлений.

### **Литература**

1. Матвеев Л.Т. Основы общей метеорологии. Физика атмосферы. –Л.: Гидрометеорологическое издательство, 1965. 876 с.
2. Абшаев М.Т. и др. Руководство по применению радиолокаторов МРЛ-4, МРЛ-5 и МРЛ-6 в системе градозащиты. –Л.: Гидрометеоздат. 1980
3. Лёзин Ю.С. Введение в теорию и технику радиотехнических систем: Учеб. пособие для вузов. – М.: Радио и связь, 1986. – 280 с.
4. Степаненко В.Д. Радиолокация в метеорологии.– Л.: Гидрометеоздат, 1973. 343 с.
5. Толмачева И.И. Исследование характеристик турбулентности в облаках и безоблачной атмосфере / Географический вестник. Метеорология, 2(33) 2015.–С.46-53
6. Иванников А.П., Иванников Д.А., Измайлова Я.А. Способ обнаружения зон повышенной турбулентности и оценки их параметров в облаках / Радиотехнические и телекоммуникационные системы, №2, 2018. -С.5-14.